

Notre avenir pétrolier : La recherche en mer

Pierre MASSON *

RESUME

Aujourd'hui, nos besoins en énergie sont assurés en majeure partie par les hydrocarbures qui, malheureusement, n'existent qu'en quantité finie.

Aussi, notre avenir pétrolier à moyen terme reste incertain si, la crise s'effaçant, la consommation d'énergie reprend une courbe croissante.

Un effort d'exploration sans précédent reste donc nécessaire pour permettre avant la fin du siècle la relève par d'autres sources d'énergie.

L'augmentation du prix du pétrole rendra possible l'exploitation de sources d'hydrocarbures d'accès plus difficiles notamment dans les zones marines éloignées de la côte et à des profondeurs d'eau de plus en plus grandes.

En effet, les grands bassins pétroliers potentiels encore inviolés pouvant exister sur terre se font rares et sont situés dans des régions hostiles (Sibérie orientale, zone arctique, etc...).

Ce sont donc les zones marines des marges continentales qui constituent le domaine d'investigation préférentiel de la prochaine décennie ; ces zones couvrent une surface de 75 millions de km², soit les surfaces des Amériques, de l'Europe et de l'Afrique du Nord réunies.

Jusqu'il y a peu, seule la plate-forme continentale jusqu'à la cote — 200 mètres et à faible distance des côtes a fait l'objet d'un effort d'exploration intensif. Déjà aujourd'hui, 21 % des réserves prouvées se trouvent en mer et 17 % de la production mondiale vient de celle-ci.

L'évolution des connaissances géologiques acquises grâce aux campagnes sismiques océaniques et aux forages d'investigation du fond des océans ont étendu aujourd'hui les zones potentielles au talus

SAMENVATTING

In onze energiebehoeften wordt thans grotendeels voorzien door de koolwaterstoffen die jammer genoeg slechts in beperkte hoeveelheid aanwezig zijn.

Onze olietoekomst op middellange termijn blijft dus onzeker indien bij het verdwijnen van de crisis het energieverbruik opnieuw in stijgende lijn zal gaan.

Er is bijgevolg een ongeëvenaarde exploratiepoging nodig tot het einde van de eeuw wanneer andere energiebronnen beschikbaar zullen zijn.

De olieprijsstijging zal de ontginning mogelijk maken van moeilijker toegankelijke koolwaterstofbronnen, met name in de zeezones die ver verwijderd liggen van de kust en op steeds grotere waterdiepten.

De nog niet aangetaste, grote, potentiële oliebekkens die op aarde kunnen bestaan worden zeldzaam en liggen in ontoegankelijke streken (Oost-Siberië, het Noordpoolgebied, enz.).

De zeezones van de continentale randgebieden vormen dus het onderzoeksdomain bij uitstrek van het volgende decennium; de zones beslaan een oppervlakte van 75 miljoen km², d.i. de oppervlakten van Amerika, Europa en Noord-Afrika te zamen.

Tot voor kort werd enkel het continentale plat tot aan de kust — 200 meter en op kleine afstand van de kust intensief verkend. Nu reeds bevinden zich 21 % van de aangetoonde reserves in de zee en 17 % van de wereldproductie komt hier vandaan.

De evolutie van de geologische kennis, verworven dank zij de seismische campagnes in de oceanen en de onderzoekboringen in de oceaانبodem, heeft de potentiële zones thans uitgebreid tot het continentale talud, en in bepaalde gevallen tot de continentale glooiing naast de diepzeevlakten.

* Directeur général Adjoint, Petrofina S.A., rue de la Loi, 33 - B-1040 Bruxelles.

continental et, dans certains cas, au glacis continental en marge des plaines abyssales.

On peut concevoir que près de 40 % des réserves futures seront trouvées en mer et qu'une très grande partie de la production en proviendra, mais ce sera cependant le rapport coût/profit qui sera déterminant pour la mise en valeur de ces réserves.

ZUSAMMENFASSUNG

Unser Energiebedarf wird heutzutage grosstenteils durch die Kohlenwasserstoffe gedeckt, die leider nur in begrenzten Mengen vorhanden sind.

Was nun die Ölversorgung anbetrifft, so bleibt die Zukunft mittelfristig ungewiss, wenn mit dem Abklingen der Ölkrise die Energieverbrauchskurve wieder in die Höhe steigt.

Deshalb soll man sich unbedingt noch stärker als in der Vergangenheit um die Forschung bemühen, damit noch vor der nächsten Jahrhundertwende die Ablösung durch weitere Energiequellen gesichert ist.

Die Erdölverteuerung wird die Ausbeute schwer zugänglicher Kohlenwasserstoffquellen ermöglichen, unter anderem in den Hochseegebieten und bei immer grösser werdenden Wassertiefen.

Die grössten noch unberührten Erdölvorkommen, die sich irgendwo auf der Erde befinden können, werden immer seltener und liegen in unfreundlicher Umwelt (Ostsibirien, Nordpolarländer, usw.).

Im nächsten Jahrzehnt werden daher vorzugsweise die am Rande der Kontinente gelegenen Seegebiete erforscht. Diese Zonen erstrecken sich über eine Fläche von 75 Millionen Quadratkilometer, das ist die Fläche von Nord- und Südamerika, Europa sowie Nordafrika zusammen.

Bis vor kurzem wurde nur der Festlandsockel bis minus 200 m. Tiefe bzw. in Küstennähe intensiv erforscht. Heute schon befinden sich 21 % der nachgewiesenen Ölreserven im Meeresboden, und 17 % der Weltproduktion stammen aus diesem Meeresgrund.

Durch die Entwicklung der geologischen Erkenntnisse, die dank der seismischen Tätigkeit im Ozean bzw. der Tiefbohrungen zur Erkundung des Meeresgrundes gesammelt wurden, ist man heute bereits bis an den Kontinentalabfall und in gewissen Fällen an die äussere kontinentale Böschung am Rande der abyssischen Ebenen herangegangen.

Man kann sich vorstellen, dass etwa 40 % der zukünftigen Ölreserven auf dem Meeresboden zu suchen sind und dass ein sehr grosser Teil der Ölproduktion aus dem Meer stammen wird, jedoch wird das Kosten-Ertrag-Verhältnis für die Ausbeute dieser Reserven massgebend sein.

Men kan stellen dat ongeveer 40 % van de toekomstige reserves in de zee zullen worden aangetroffen en dat een zeer groot gedeelte van de produktie daaruit zal voortkomen, maar de verhouding kosten/winst zal evenwel bepalend zijn voor de ontginning van deze reserves.

SUMMARY

Today, our energy needs are covered in a major part by the hydrocarbons. Unfortunately, these hydrocarbons exist only in limited quantity.

Thus, our medium-term future remains rather uncertain, particularly if — the recent crisis fading away — the consumption of energy resumes its climbing.

An unprecedented effort in petroleum exploration is necessary now, in order to allow other sources of energy to take over before the end of the century.

The increased price of oil will make it possible to exploit less accessible sources of hydrocarbons, particularly in the offshore areas far from the coasts and with increasing water depths.

Actually, onshore, the large untapped basins are becoming rare and are located in hostile environment (Eastern Siberia, Arctic, etc...).

Consequently, the marine areas of the continental margins represent the preferential hunting-ground for the explorationists during the next decade. These marine areas cover some 75 millions of square kilometers i.e. the surface of both Americas, together with Europe and North Africa.

Until recently, only the continental shelf — from the shore down to 200 m of water and close to the coasts — has been intensively investigated: it already contains 21 % of the world proven reserves and provides 17 % of the total world production.

According to the geological information acquired by the marine seismic and the ocean floor exploratory drilling, the continental slope (and in some cases even the continental rise) can be considered today as prospective.

It can be assumed that the offshore areas will provide 40 % of the future reserves and a very large part of the future production. However, the cost/profit ratio will be the determining factor for the exploitation of these reserves.

1. INTRODUCTION

Le problème de l'énergie est aujourd'hui au centre des débats de maints organismes nationaux ou internationaux parce qu'il touche au souci le plus immédiat de tout Gouvernement qui est, supposons-le, d'accroître le niveau de vie de la population. Or, cette croissance a été compromise par les manipulations arbitraires des prix du pétrole qui fournit plus de 50 % d'énergie consommée dans le monde. Et, on le sait, le PNB et la consommation d'énergie sont deux paramètres étroitement liés.

Si cette manipulation, en l'occurrence le quadruplement du prix en moins de deux ans par les pays producteurs, a été possible, c'est pour trois raisons fondamentales.

- Le pétrole est très inégalement réparti à la surface du globe, les trois-quarts des réserves connues se trouvant dans les pays sous-développés ou en voie de développement, dont 56 % au Moyen-Orient (fig. 1).

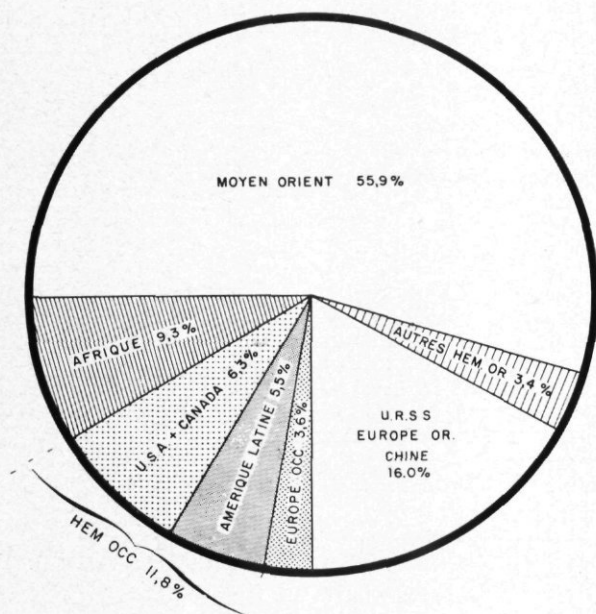


Fig. 1. — Réserves mondiales d'huile « prouvées et publiées » fin 1974 (juin 1975)

- Les pays industrialisés, sauf l'U.R.S.S., accusent un déficit considérable de production par rapport à la demande : 96 % pour l'Europe de l'Ouest, 40 % pour les U.S.A., d'où leur vulnérabilité. Ils sont donc ravitaillés en majeure partie par le tiers-monde.
- Les quantités de pétrole sont limitées. Aussi l'accroissement exponentiel de la demande ne pouvait que mener à très court terme à l'impasse si au pétrole ne se substituait pas très rapidement autre chose, le nucléaire par exemple, l'énergie

solaire, etc... Cette situation, signalée par tous les experts à la fin des années 70, et nous-mêmes nous en sommes fait l'écho aux 1ères Journées de l'Industrie Minérale en décembre 1971, a été parfaitement comprise par les pays producteurs. Ils ont saisi la chance qui leur était offerte de tirer au moment opportun le maximum de revenus d'un produit condamné à moyen terme. Vous connaissez la suite.

C'est pourquoi depuis peu s'est accélérée la recherche de nouvelles sources pétrolières dans des régions de la planète de plus en plus difficiles d'accès, mais mieux réparties à la surface du globe et en l'occurrence plus proches des zones de consommation. Je veux parler du domaine marin qui, heureux bénéficiaire du renchérissement considérable du prix du pétrole, devient aujourd'hui de plus en plus accessible : « toujours plus loin, toujours plus profond », telle pourrait être aujourd'hui la devise des pétroliers et j'ajouterai à l'adresse des « environnementalistes » : « honni soit qui mal y pense ».

Mais toutes les mers et océans sont-ils réellement exploitables ? Ce sera notre propos d'aujourd'hui.

2. RAPPEL DE LA SITUATION DU PETROLE DANS LE BILAN ENERGETIQUE

Les réserves connues récupérables sont proches de 100 milliards de tonnes. On a, en effet, découvert à ce jour environ 139 milliards de tonnes et consommé 43 milliards, soit un peu plus du tiers.

Au rythme d'accroissement de la consommation des dernières années, on peut constater que la durée de vie des réserves, à production constante, ne fait que baisser depuis 1958, passant de 42 ans à 33 ans (fig. 2).

De plus, les découvertes annuelles calculées sur des moyennes de 5 ans ont tendance à se stabiliser autour de 4,5 milliards de tonnes par an. Ce chiffre est encore légèrement supérieur à la consommation prévue en 1980, mais inférieur à celle prévue par le SRI* en 1990 (4,8 milliards de tonnes) (fig. 3).

Si on considère seulement le monde libre, la situation est plus grave, car la moyenne des découvertes actuelles et attendues ne dépasse plus la production pourtant diminuée de 1975 (fig. 4).

Nous sommes donc proches du point de non-retour qui devrait être atteint en 1980-1985. A cette époque, les réserves découvertes mondialement ne compenseront plus la consommation si celle-ci ne diminue pas.

* Stanford Research Institute.

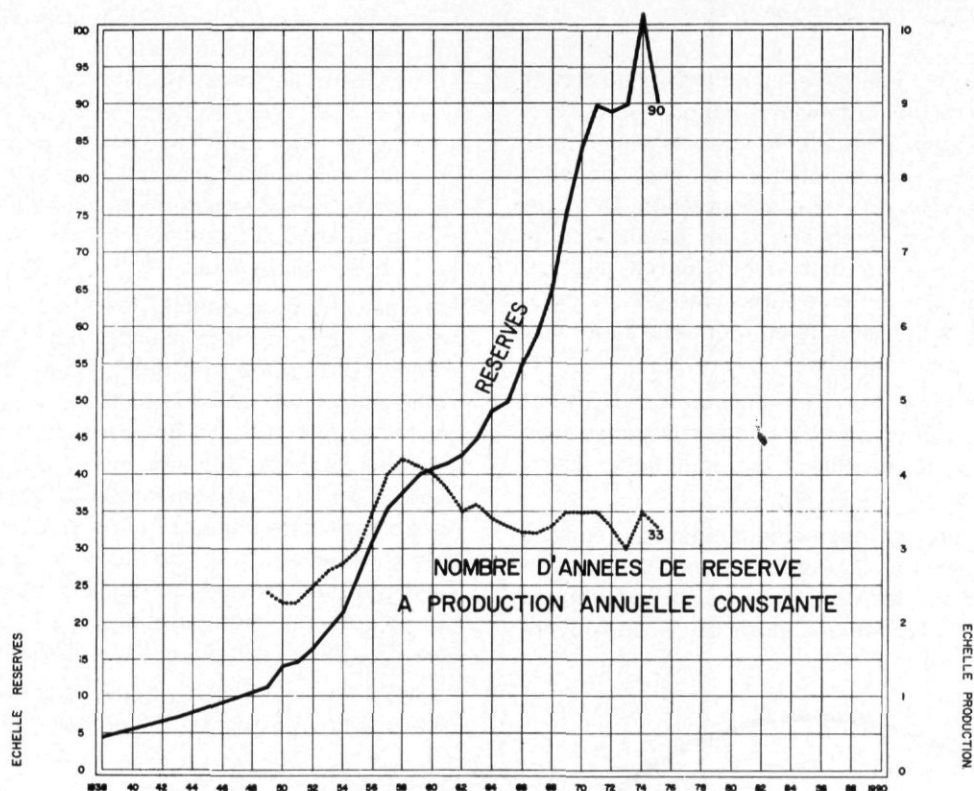


Fig. 2. — Evolution des réserves d'huile en tonnes 10^9
(conversion 7 bbls = 1 t) — Valeurs au 31 décembre
de chaque année. Source : A.P.I. & O.G.J.

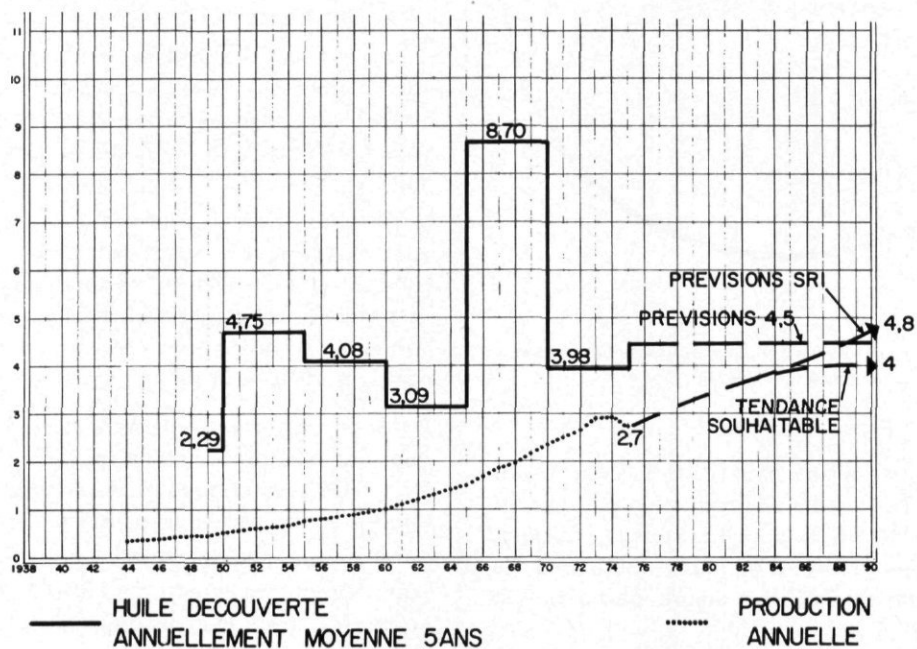


Fig. 3. — Comparaison entre production annuelle
et huile découverte annuellement en milliards de tonnes —
Situation au 31 décembre de chaque année.
Source : A.P.I. & O.G.J.

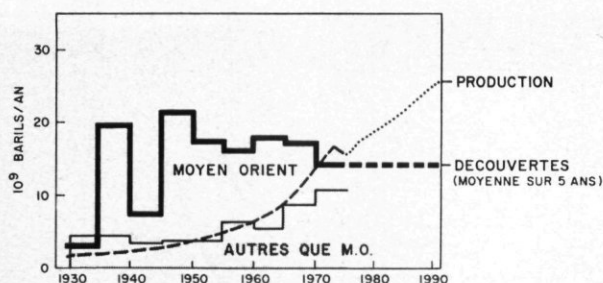


Fig. 4. — Rythme de découverte des réserves d'huile (monde libre).

D'après Exxon in O.G.J. - 1975

— Compte tenu des incidences de la crise, l'accroissement de la consommation en énergie qui était d'environ 5 % l'an au cours de la décennie 1960-1970 (doublement en 15 ans), après s'être stabilisé ou devenu légèrement négatif en 1974 et 1975, devrait reprendre en 1976, mais sans doute à un rythme moindre. Certains tablent sur 3,5 % l'an au cours des années 1977-1990, soit un doublement en 20 ans.

Aujourd'hui, la consommation mondiale d'énergie est voisine de $5,9 \cdot 10^9$ TEP (*). En 1990, la consommation devrait être à peine supérieure à $9 \cdot 10^9$ TEP, si notre taux d'accroissement reste valable. Certains prévoient davantage : le S.R.I. envisage $11,7 \cdot 10^9$ TEP pour la même époque et les évaluations présentées récemment à la conférence Nord-Sud donnent le chiffre de $9,9 \cdot 10^9$ TEP pour 1985, ce qui nous paraît excessif. Mais dans toutes les estimations, la part des hydrocarbures diminue et devrait être inférieure à 60 % (40 % huile - 20 % gaz) vers les années quatre-vingt-dix.

— Cela revient à dire que, dans 15 ans, la consommation d'hydrocarbures devrait se situer entre $5,5$ et $7 \cdot 10^9$ TEP, l'huile à elle seule comptant pour 4 à 5 milliards contre 2,7 milliards actuellement (2,1 milliards pour le monde libre). Entretemps, plus de la moitié des réserves d'huile prouvées aujourd'hui aura été consommée et, pour répondre à la demande future avec une marge de sécurité suffisante, il faudrait en 1990 disposer d'au moins $150 \cdot 10^9$ tonnes de réserves prouvées, soit avoir découvert plus de 100 milliards de tonnes.

Pour le monde libre (fig. 5), un taux d'accroissement de 4 % par an est donné pour les 15 prochaines années, les hydrocarbures représentant encore 63 % en 1990, dont 49 % pour l'huile contre 55 % aujourd'hui.

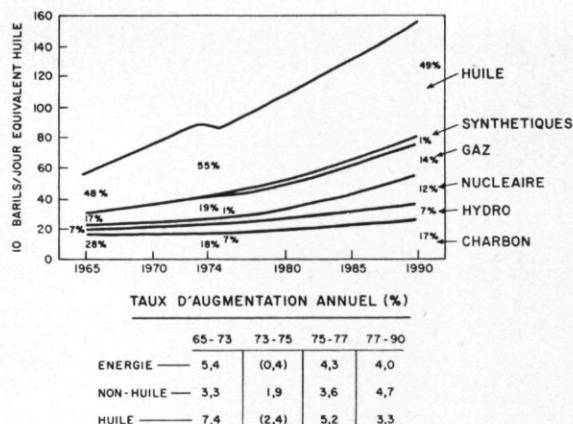


Fig. 5. — Evolution des sources d'énergie (monde libre)

D'après Exxon in O.G.J. - 1975

On voit donc que notre approvisionnement en huile à moyen terme dépend essentiellement des découvertes qui seront faites et du rythme de leur mise en exploitation. Or, le pétrole existe en quantité finie et malheureusement ce qui reste à découvrir sur la planète varie selon les experts entre 150 et 300 milliards de tonnes, la première valeur étant sans doute plus réaliste, comme on le verra

On touche donc le fond du tonneau

Sur un schéma intégré (fig. 6), on peut apprécier immédiatement la gravité du problème car les réserves importantes en pétrole théoriquement extractibles des schistes bitumineux, des sables asphaltiques et des sables à huile lourde, ne peuvent en pratique intervenir en grandes quantités par suite des problèmes de mise en œuvre.

A moyen terme, seules les réserves de pétrole conventionnelles sont à prendre en considération.

On constate que, si la part du pétrole dans la consommation d'énergie devait, par exemple, rester constante à 50 %, on tirerait sur les réserves existantes et sur celles en puissance à un rythme physiquement impossible. Le réalisme voudrait que, dès les années quatre-vingt-cinq, le pourcentage du pétrole dans le bilan énergétique tombe à 40 % pour n'être plus que de 25 % à la fin du siècle. Mais là réside la difficulté : l'alternative nucléaire sera-t-elle prête avec toute garantie de sécurité ? ou bien devons-nous alors limiter pour un certain temps l'accroissement de la consommation énergétique avec toutes les conséquences que cela implique pour les pays industrialisés dont le niveau de vie serait affecté et plus encore pour les pays en voie de développement dont la croissance serait stoppée ?

Les prévisions pour le gaz sont les mêmes avec une meilleure prospective immédiate (fig. 7).

Comme aucune percée technologique spectaculaire sur le plan énergétique capable d'être appliquée

* La TEP (tonne équivalent pétrole) = $7,33$ barils d'huile - $1,149$ m^3 huile - 1205 m^3 gaz.

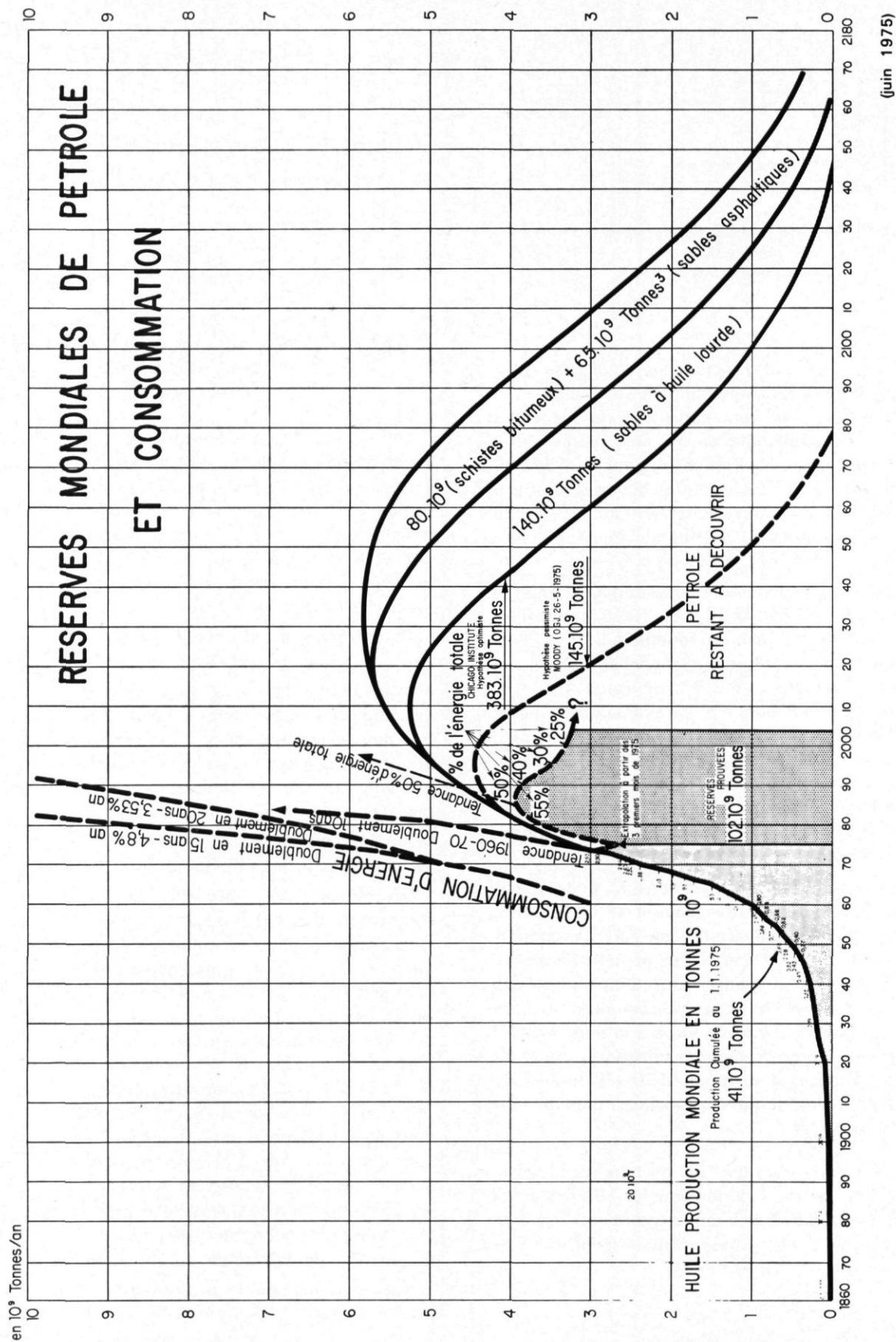
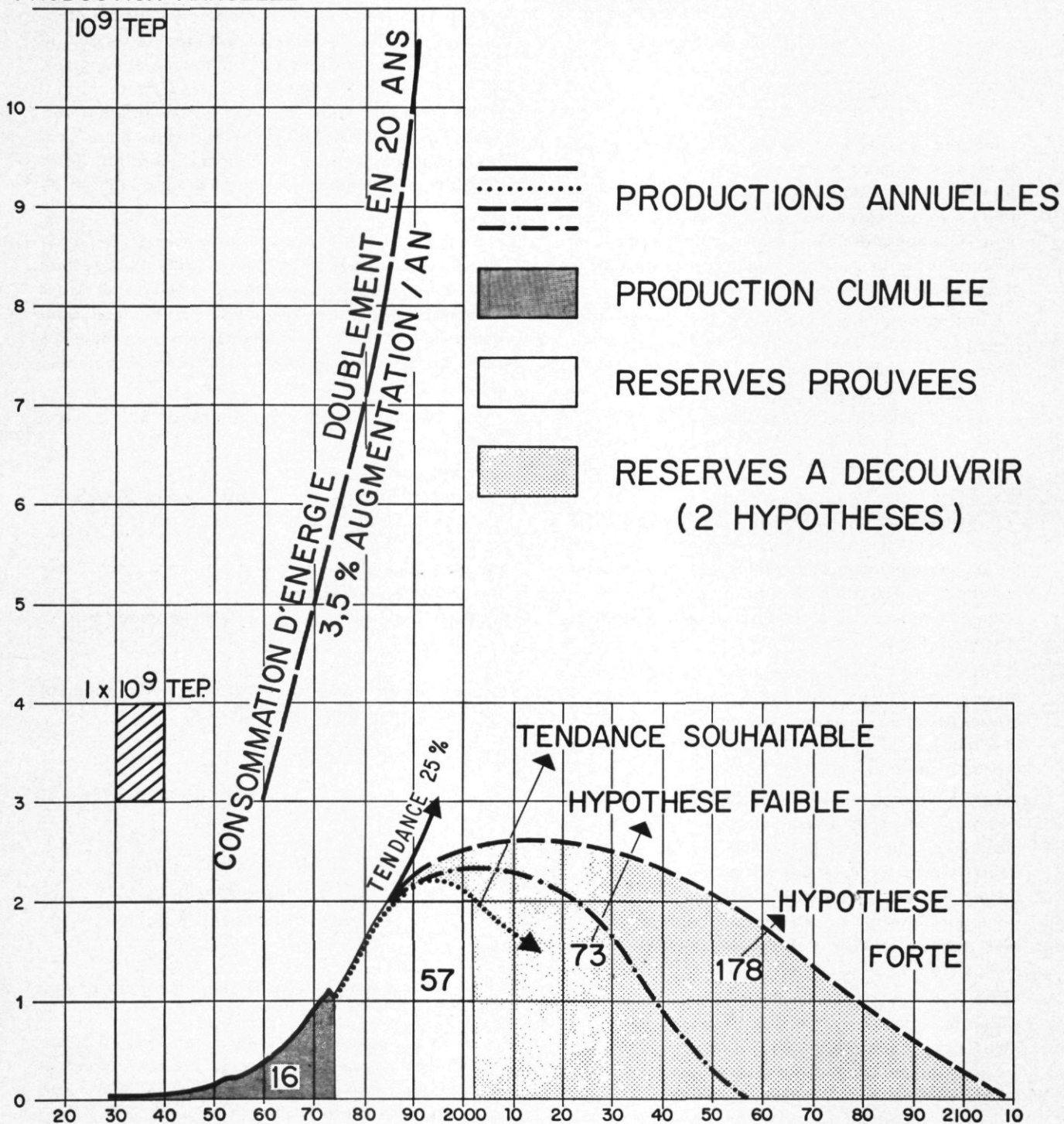


Fig. 6.

RESERVES & PRODUCTION GAZ

(EN 10^9 TEP)

PRODUCTION ANNUELLE



(janvier 1976)

Fig. 7.

sans délai n'est imaginable au cours des 25 années restantes de ce siècle et le nucléaire étant de plus en plus contesté, voyons ce que l'on peut encore faire pour assurer le mieux possible l'approvisionnement en hydrocarbures.

3. LE DOMAINE MARIN

3.1. Généralités

Comme vous le savez, les hydrocarbures sont issus de la transformation au cours des temps géologiques des matières organiques enfouies dans les sédiments, grâce à un processus physico-chimique où interviennent la température, la pression et le temps. C'est donc dans les bassins sédimentaires qu'on doit les chercher.

L'inventaire de ces bassins, en zone terrestre, s'il n'est pas achevé, est en tout cas fort avancé et plusieurs de ceux-ci sont déjà en voie d'épuisement ; qu'il nous suffise de citer : l'Ouest Canadien, la Pennsylvanie, l'Oklahoma, les bassins de Californie, le Texas, le bassin de Vienne, la région de Bakou, la zone des grands champs d'Iran, le Lac Maracaïbo, etc...

Il reste encore de vastes régions peu prospectées, mais ou bien elles sont dans un environnement hostile et très éloignées des centres de consommation comme la Sibérie Orientale, l'Antarctique, ou bien les premières prospections ont été décevantes, l'Amazonie par exemple.

Par contre, il existe un territoire immense encore mal exploré, mieux distribué géographiquement et que les pétroliers ont appris à découvrir depuis 20 ans et à dompter technologiquement, je veux parler du domaine marin (fig. 8).

Les premières exploitations marines furent évidemment destinées à exploiter la partie marine des gisements à cheval sur la côte. On connaît de la sorte de très vieilles exploitations sur pilotis, au bord de la Caspienne dans la région de Bakou et en Argentine à Comodoro Rivadavia, sur le Lac Maracaïbo, etc... Mais celles-ci étaient très limitées, les moyens de prospection manquaient et la technique était insuffisante.

Plus tard, dans les zones marécageuses du Delta du Mississippi, par suite des difficultés de pénétration, les pétroliers eurent l'idée d'installer les appareils de forage sur des pontons amenés à pied d'œuvre grâce à des canaux creusés par des dragues. Ces pontons ont ensuite été utilisés dans les zones lagunaires près de la côte, puis on les a transformés en plates-formes auto-élévatrices. La technique était née. Corollairement, la prospection sismique faisait d'énormes progrès et des marais où l'on opérait en canots, on est

passé aux lagunes, puis à la mer ouverte, avec des bateaux spécialement équipés d'un matériel constamment amélioré. Aujourd'hui, il n'y a pas de limite à la prospection sismique en mer.

Après la guerre, la Louisiane fut le théâtre d'une grande activité marine et des dizaines de champs furent découverts et développés dans des profondeurs d'eau chaque jour plus grandes. La technique s'est rapidement exportée à d'autres régions, notamment dans le Golfe Persique, l'Ouest Africain, l'Indonésie, la Mer du Nord. On exploite maintenant à 350 km des côtes et par 150 m de fond et les plans sont prêts pour atteindre 300 m. Et déjà aujourd'hui, 16 et 13 % respectivement des productions d'huile et de gaz viennent de la mer (fig. 9 et 10).

C'est un domaine tout à fait nouveau qui s'est ouvert aux géologues et l'océanographie est devenue tout à coup une science appliquée. Il fallait analyser et comprendre ce qui se passait sur les marges continentales, dans les grands fonds océaniques, dans les mers bordières et essayer d'apprécier le potentiel pétrolier de ces régions.

En effet, si la surface du globe est de 511 millions de km²,

les terres émergées en occupent	150 millions, soit 29 %,
les marges continentales y compris les bassins marins isolés,	94 millions, soit 18 %,
le domaine océanique profond	270 millions, soit 53 %, (fig. 11).

Or, comment se présentent morphologiquement les différentes régions immergées ?

3.2. Les différentes zones du domaine marin et leurs caractéristiques

Le schéma morphologique simplifié est le suivant (fig. 12 et 13).

En se déplaçant de la côte vers le large, on distingue d'abord le *plateau continental* dont la profondeur d'eau ne dépasse guère les 200 m (quelquefois 300 m dans les zones boréales) et dont la largeur peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres. Ensuite, un *talus*, de pente plus ou moins forte allant jusqu'à une profondeur de l'ordre de 2.500 m en moyenne.

Puis, le *glacis continental* de pente plus faible pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres

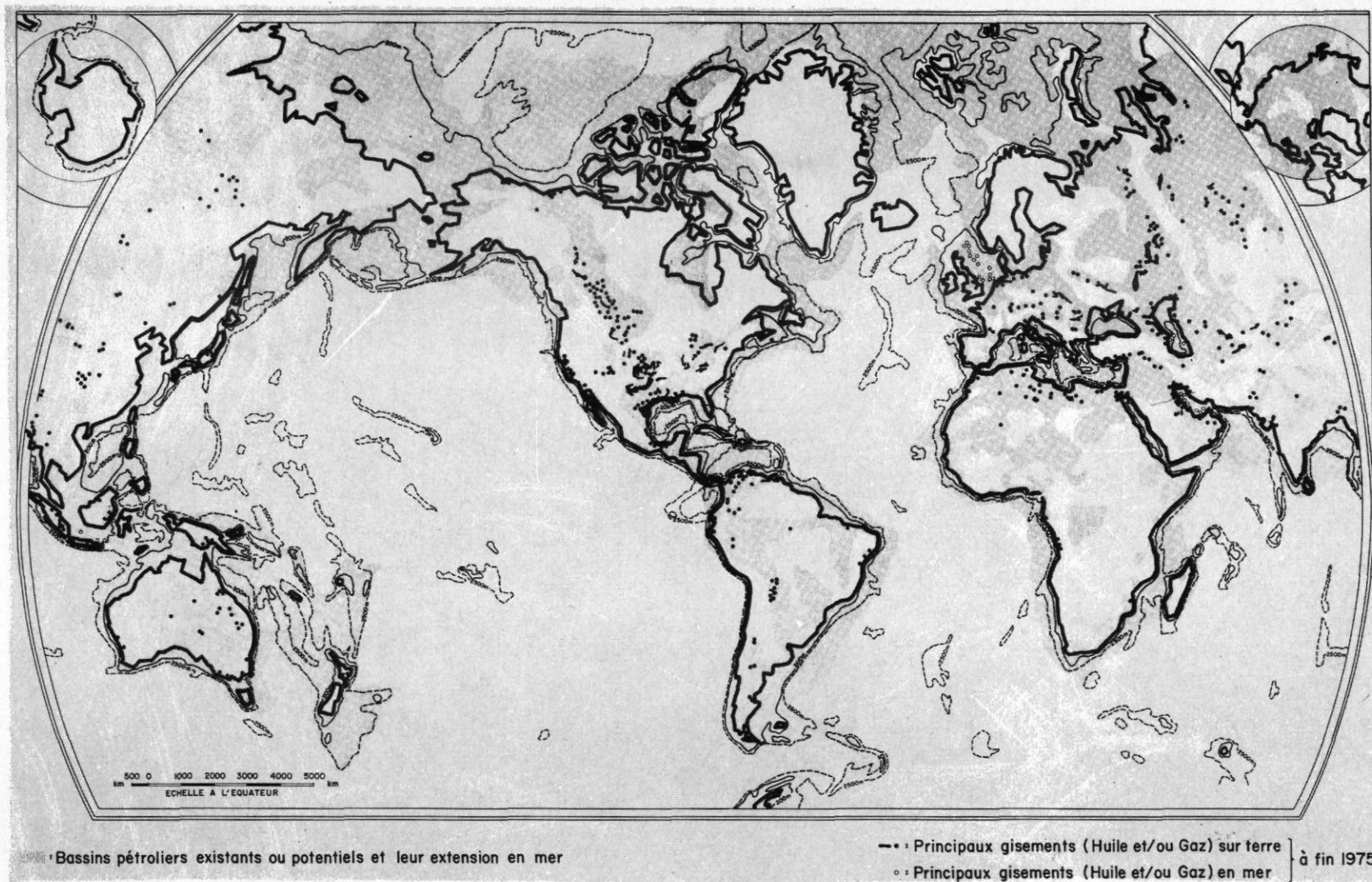


Fig. 8. — Les bassins pétroliers dans le monde.

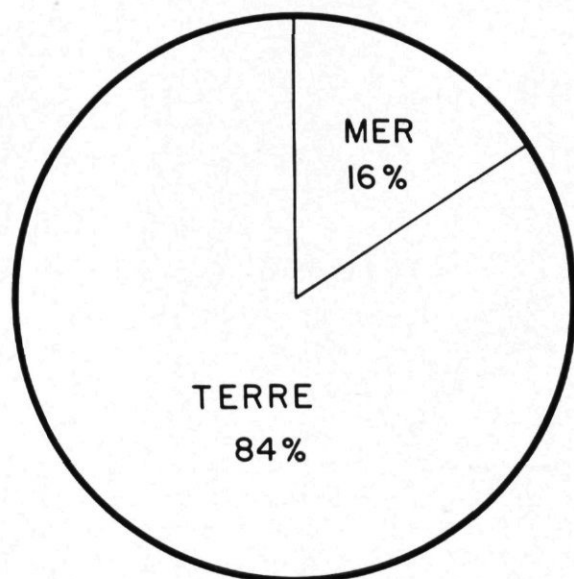


Fig. 9. — Production mondiale d'huile en 1974 :
 $2,9 \times 10^9$ tm (janvier 1976)

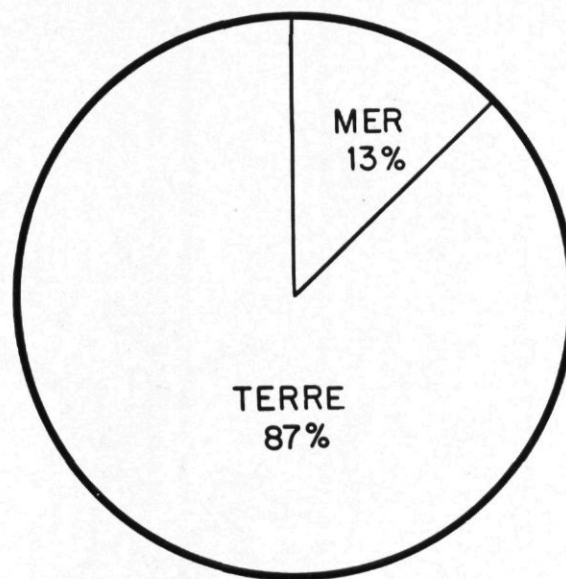
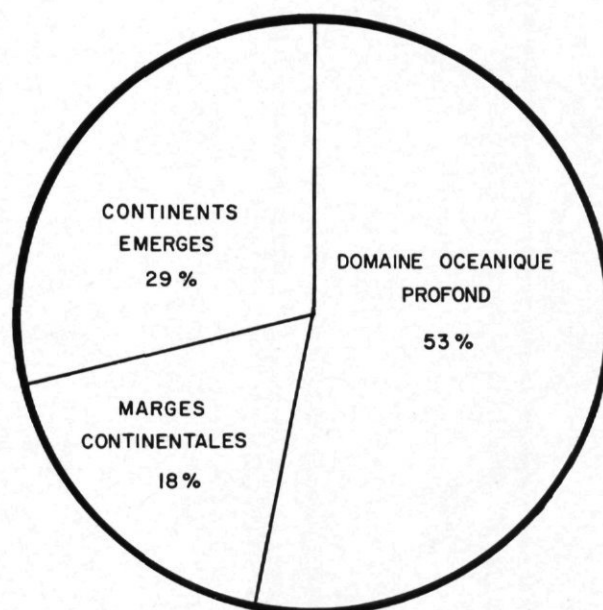


Fig. 10. — Production mondiale de gaz en 1974 :
 $1343,5 \times 10^9$ m³ (janvier 1976).



SURFACE TOTALE DU GLOBE :
 511×10^6 Km²

JAN 1976

Fig. 11. — Répartition des domaines marins et continentaux.

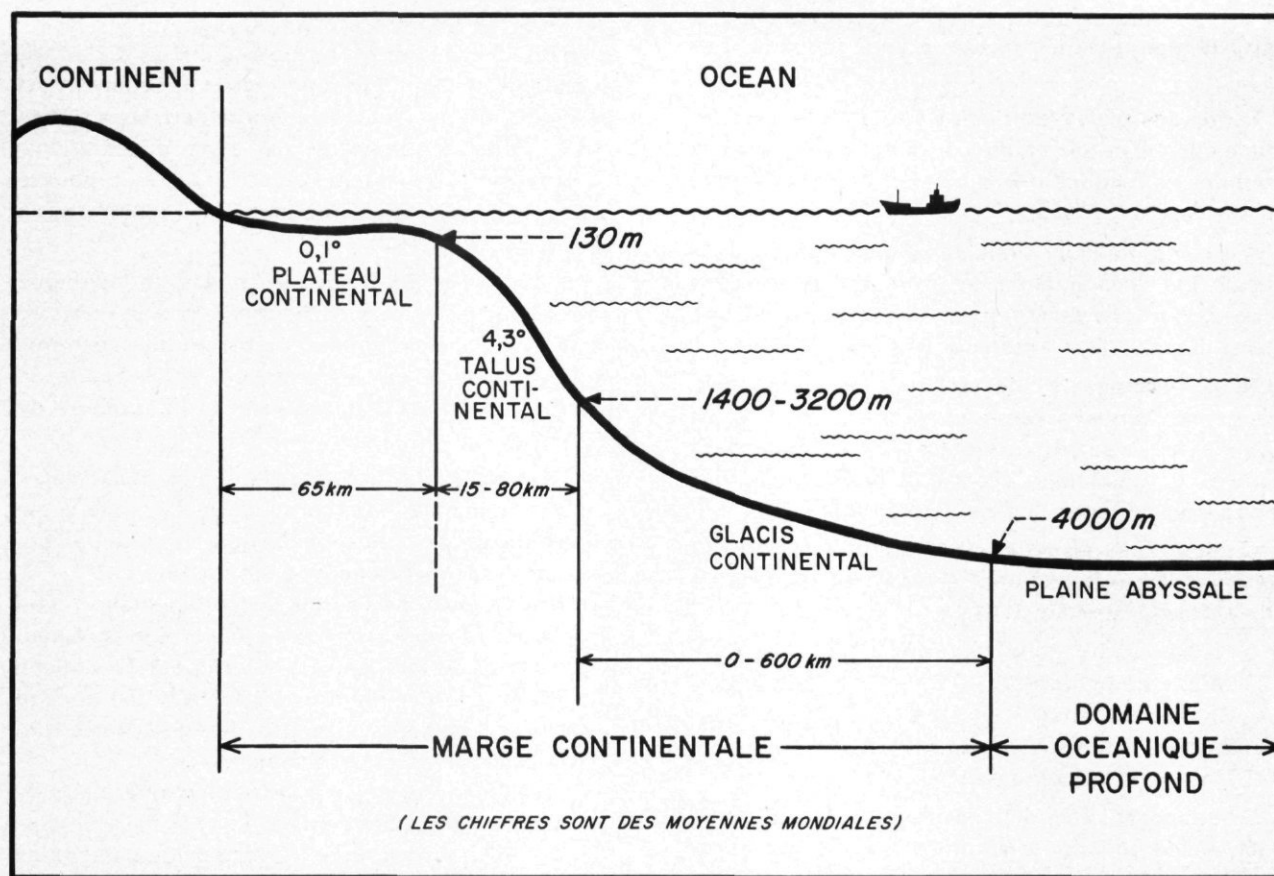


Fig. 12. — Profil général des marges continentales.
D'après U.S.G.S. - Circ. 694 - 1974.

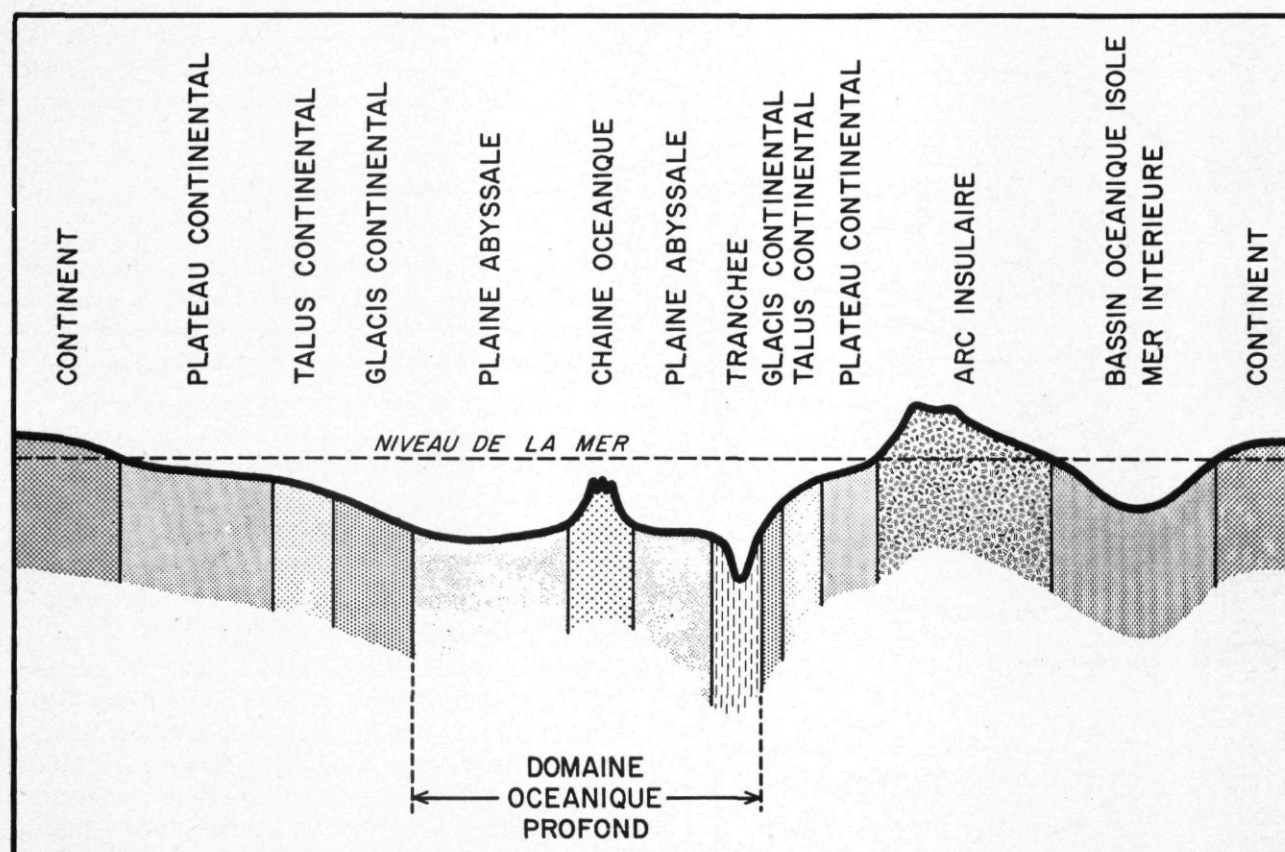


Fig. 13. — Les différentes zones du domaine océanique.
D'après Weeks « The Geology of Continental Margins » - 1974.

de largeur jusqu'à 3.500 à 4.000 m de profondeur, à partir duquel commencent les grands fonds océaniques.

Parfois, ce glacis fait défaut et une tranchée profonde s'ouvre au pied du talus comme c'est le cas en bordure des Aléoutiennes ou du Pérou, par exemple, ou des Iles de la Sonde.

Il est important de signaler au milieu des océans une chaîne volcanique en expansion qui génère sans cesse la nouvelle croûte océanique, d'après les dernières théories de la tectonique globale.

Nous laisserons de côté, sauf certaines exceptions, les grands fonds océaniques sans intérêt pour le pétrole, car les sédiments qui les recouvrent sont, en général, de très faibles épaisseurs et nous examinerons particulièrement les marges continentales.

La répartition des différentes zones de ces marges continentales qui occupent environ 94 millions de km² est la suivante (fig. 14) :

— Plateau continental	23 %
— Talus continental	33 %
— Glacis continental	18 %
— Bassins océaniques isolés	20 %
— Tranchées océaniques	6 %

En supposant ce domaine marin potentiellement pétrolier, il ouvrirait évidemment des perspectives considérables.

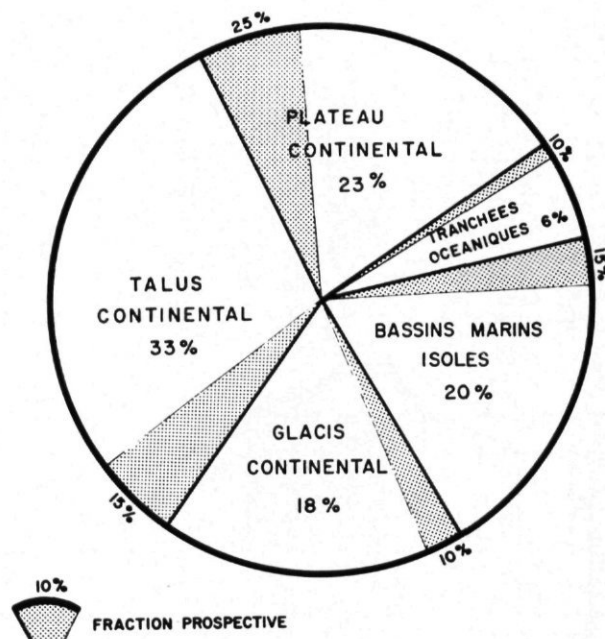


Fig. 14 — Répartition des différentes zones des marges continentales.
Surface totale : 94×10^6 km²
D'après Weeks - 1974.

Qu'en est-il exactement ?

Le problème essentiel est de savoir s'il y a, dans ce domaine, des sédiments, quels types de sédiments, si les hydrocarbures ont pu y prendre naissance et s'ils ont pu y être piégés. En quelque sorte, il faut reconstituer l'histoire géologique de ces marges et, pour le faire, s'intéresser plus que jamais à l'histoire de la planète tout entière.

Au cours des dix dernières années, la technique sismique et les techniques de forage en mer, mises au service de l'océanographie, de même que l'extrême intérêt manifesté par les pétroliers ont fait faire un grand pas dans la connaissance de la structure de notre planète.

- D'abord, on a précisé ce que l'on savait déjà que, dans les fonds océaniques, la partie supérieure de la croûte océanique est uniquement formée de roches de type basaltique.
- Ensuite que, sur les marges continentales, cette croûte océanique fait place à la croûte continentale comportant une forte épaisseur de couche granitique, elle-même recouverte d'une épaisse tranche de sédiments, produits de l'érosion intense des masses continentales.
- Finalement, que l'on pouvait distinguer deux types de marge continentale :
 - 1°) le type Atlantique, caractéristique des bords de l'Atlantique et de certaines régions de l'Océan Indien, Afrique Orientale et Australie,
 - 2°) le type Pacifique, associé à des orogènes actifs, comme le bord oriental du Pacifique, ou à des guirlandes insulaires volcaniques, comme le bord occidental du même océan

3.2.1. Les marges de type Atlantique ou passif (fig. 15)

Elles se caractérisent par un vaste plateau continental, un talus plus ou moins étroit et un glacis de largeur variable. Les épaisseurs de sédiments peuvent dépasser 8.000 m sous le plateau continental.

A la rupture de pente, entre le plateau et le talus, on note fréquemment une remontée du socle continental, avec un amincissement des sédiments.

En bas du talus, aux abords du glacis, cette épaisseur atteint un maximum qui peut aller jusqu'à 10.000 m pour s'amenuiser vers le large où finalement les sédiments peu épais couvrent directement la croûte océanique.

Cette disposition est en relation, selon l'hypothèse de la tectonique globale, avec l'ouverture de l'Atlantique qui a commencé au Jurassique et l'écartement progressif des deux masses continentales par création de croûte océanique à partir de la zone de fractures médianes (aujourd'hui la chaîne médiane Atlantique),

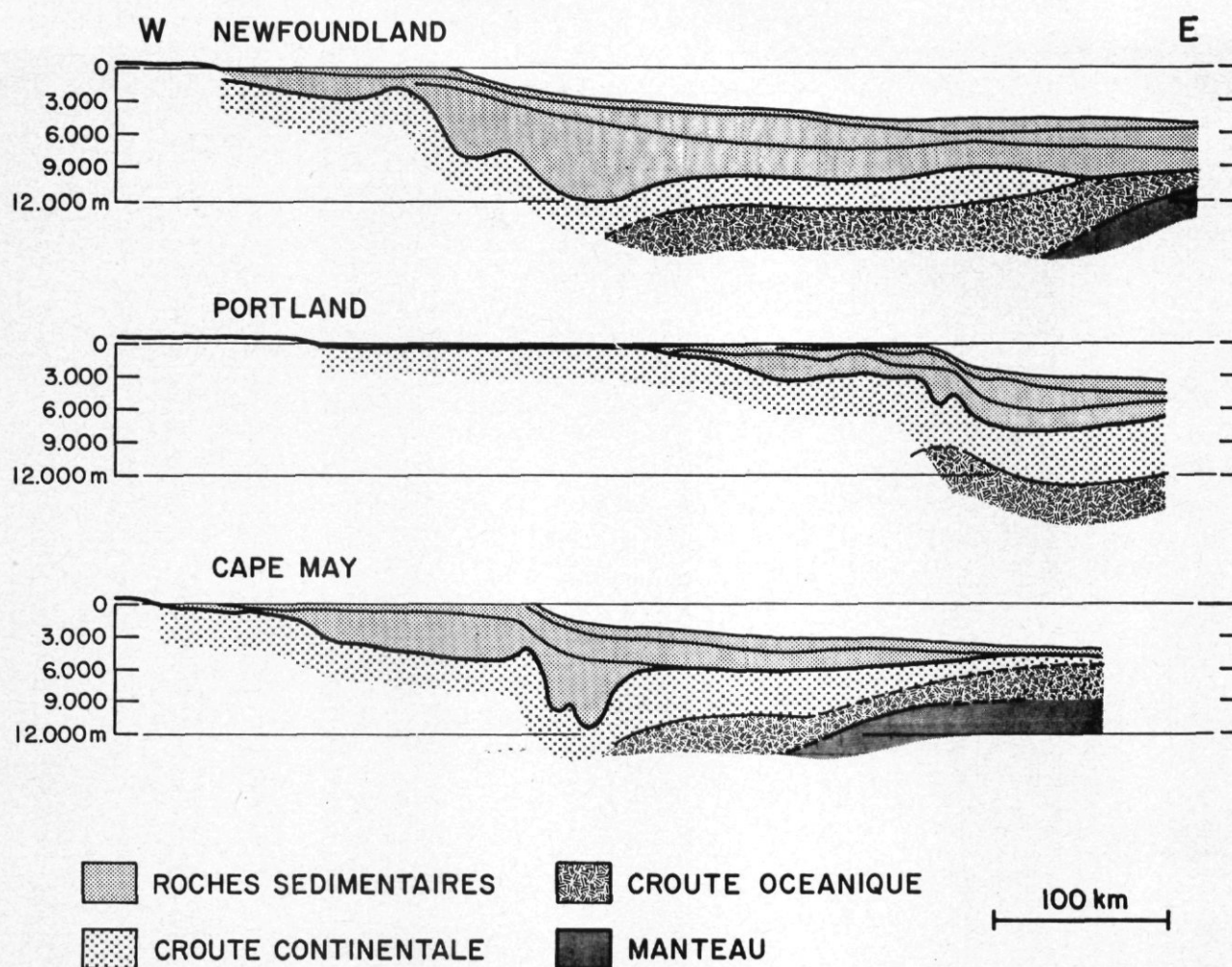


Fig. 15. — Marges continentales de type « Atlantique ».
Ex. : Amérique du Nord.
D'après Drake et al. - 1959.

croûte dont l'âge est de plus en plus jeune au fur et à mesure que l'on s'approche de cette zone de fracture encore active aujourd'hui.

— Aussi trouve-t-on de chaque côté de l'océan, à des âges successifs mais toujours dans la même séquence :

- d'abord les sédiments les plus anciens, clastiques et d'origine continentale ou lacustre, correspondant aux bassins d'effondrement qui jalonnent le rift,
- puis, les recouvrant, un épisode évaporitique souvent marqué par une grosse épaisseur de sel dû aux premières incursions marines dans le rift, juste avant son ouverture,
- enfin, après l'ouverture, des sédiments marins de plate-forme ou de delta d'âge de plus en plus jeune, progradant vers le large et provenant du démantèlement progressif des marges continentales.

Cette évolution des marges se traduit structurellement :

- au stade initial, par la formation de structures de tension, horsts et grabens qui affecteront surtout les sédiments les plus anciens et par un flux de chaleur élevée, favorable à la maturation de la matière organique,
- au stade ultérieur, par l'apparition de failles transformantes, perpendiculaires aux marges, qui formeront des bombements séparant l'ensemble en bassins différents,
- au stade final, par une subsidence très importante provoquant l'accumulation de sédiments très épais et par la diminution du flux de chaleur, l'axe d'expansion s'éloignant progressivement des marges.

Cette architecture est responsable de déformations qui intéressent directement la recherche pétrolière.

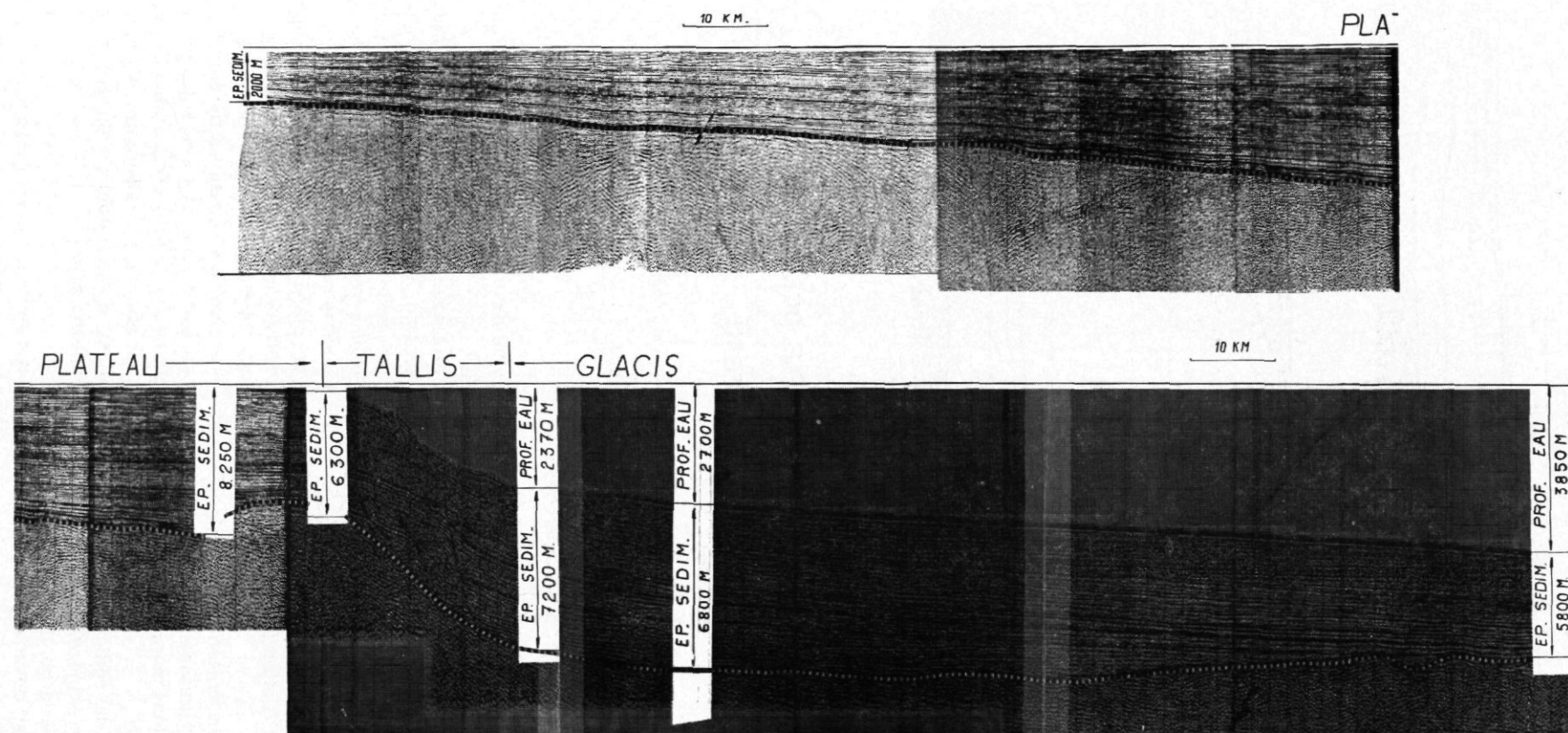


Fig. 16. — Marge Atlantique continentale.
Coupe sismique illustrative.

- Structures de horst et de graben dans les séries les plus anciennes sous couverture d'évaporites.
- Failles de croissance dans les zones de delta avec bombement argileux (Nigéria).
- Structures halokinétiques, provoquées par la présence des séries salifères.

— Deux coupes sismiques enregistrées sur les deux marges de l'Atlantique illustrent fort bien ce schéma (fig. 16 et 17). La figure 18 représente une coupe sismique provenant d'un bassin intracratonique associé à la marge orientale de l'Atlantique Nord.

3.2.2. Marges de type Pacifique ou actif

Ces marges sont caractérisées par des bassins liés à des orogènes actifs et que la tectonique globale fait coïncider avec les zones de convergence des plaques crustales (subduction).

Les experts distinguent deux sortes de bassins liés à différentes modalités du phénomène.

3.2.2.1. Les bassins liés à la convergence de plaques à croûte océanique et plaques à croûte continentale, comme c'est le cas sur toute la côte occidentale des Amériques.

On distingue du large vers la côte (fig. 19) :

- une tranchée profonde correspondant à l'enfoncement de la croûte océanique sous la croûte continentale, tranchée parfois remplie de sédiments d'eau profonde (turbidites),
- une zone côtière occupée par des bassins tertiaires fortement subsidents, remplis de sédiments terrigènes graduellement plissés sur substratum volcanico-sédimentaire mésozoïque,
- une zone interne de cordillère formée du même substratum et coupée par des bassins intramontagneux.

Ces différents types de bassins sont caractérisés par une subsidence rapide, provoquant, en milieu restreint, l'accumulation d'épaisses séries sédimentaires détritiques, marines dans les bassins côtiers, parfois lacustres dans les bassins intramontagneux, présentant des caractéristiques souvent favorables à la genèse et l'empêchement précoce du pétrole. On citera comme exemple, les bassins prolifiques de Californie, de Maracaïbo, etc...

3.2.2.2. Les bassins liés à des zones de convergence en domaine océanique, caractéristiques de l'Ouest du Pacifique et de la Tethys où l'antagonisme entre plaques se traduit par la formation d'arcs insulaires associés à des phénomènes volcaniques et sismiques.

Cette disposition favorise la création de bassins subsidents à substratum océanique, soit isolés entre les arcs insulaires externes et internes, soit entre l'arc interne et la marge continentale. Les bassins les plus

proches du continent, souvent profonds, reçoivent le plus grand afflux de matériaux détritiques et sont caractérisés, en général, par une plus grande épaisseur de sédiments. Un élément favorable à la formation de pétrole est le fort flux de chaleur qui explique, entre autres, l'existence de pétrole dans certains de ces bassins qui n'ont qu'une faible épaisseur de sédiments, 1.500 à 2.500 m, n'ayant jamais subi d'enfouissement important comme à Sumatra. A ce schéma correspondent, en bordure du Continent Asiatique et des Iles de la Sonde, les mers de Bounty, de Tonga, de Corail, de Banda, des Célèbes, de Sulu, la mer de Chine méridionale, les mers du Japon, d'Orkotsk et, sur l'axe de la Tethys, le Golfe du Mexique, la mer des Caraïbes, la Méditerranée, la Mer Noire.

Deux coupes sismiques choisies en Méditerranée illustrent assez bien ce type de bassin (fig. 20 et 21).

3.3. Aspect pétrolier du domaine marin

Cette classification sommaire des marges continentales et cette énumération avaient pour but de mieux situer la géographie des zones marines pouvant présenter un potentiel pétrolier.

Encore faut-il savoir si tout ce domaine sédimentaire est susceptible de produire des hydrocarbures.

Il y a plusieurs paramètres qu'il faut considérer.

3.3.1. Aspect géologique

3.3.1.1. La possibilité de genèse d'hydrocarbures

C'est l'étude géochimique des roches qui permet de préciser ce point.

D'abord les carottes prélevées dans les grands fonds ont, en général, montré que les sédiments qu'on y rencontre pouvaient contenir suffisamment de matière organique susceptible de se transformer en pétrole. Dans quelques cas, notamment au fond du Golfe du Mexique, sur une sorte de bombement profond (knoll), on a pu recueillir du pétrole arrivé à maturation et ayant subi déjà un processus de migration.

Les conditions de température requises pour la transformation de la matière organique étant aujourd'hui assez bien connues, l'enfouissement nécessaire des sédiments en fonction du degré géothermique peut être précisé. Les sédiments associés à la proximité d'un rift (Mer Rouge) ou à des zones de subduction océanique, en général affectées d'un flux de chaleur anormalement élevée, peuvent atteindre une maturation pétrolière sous un enfouissement moindre que sous les marges continentales beaucoup plus froides. En général, on considère maintenant

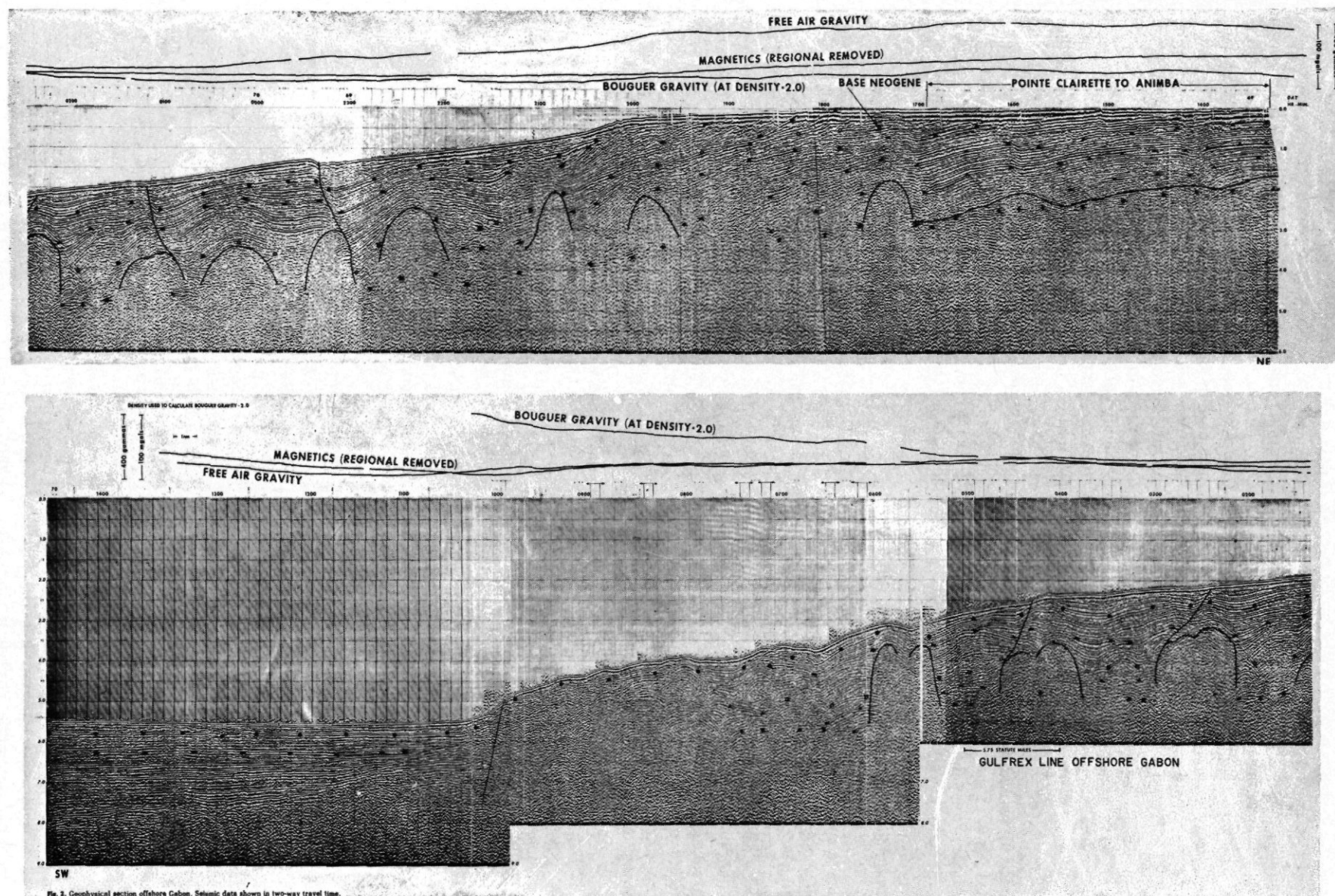


Fig. 3. Geophysical section offshore Gabon. Seismic data shown in two-way travel time.

Fig. 17. — Marge Atlantique orientale.
Coupe sismique illustrative.

Extrait de E.S. Driver et G. Pardo in
« The Geology of Continental Margins » - 1974.

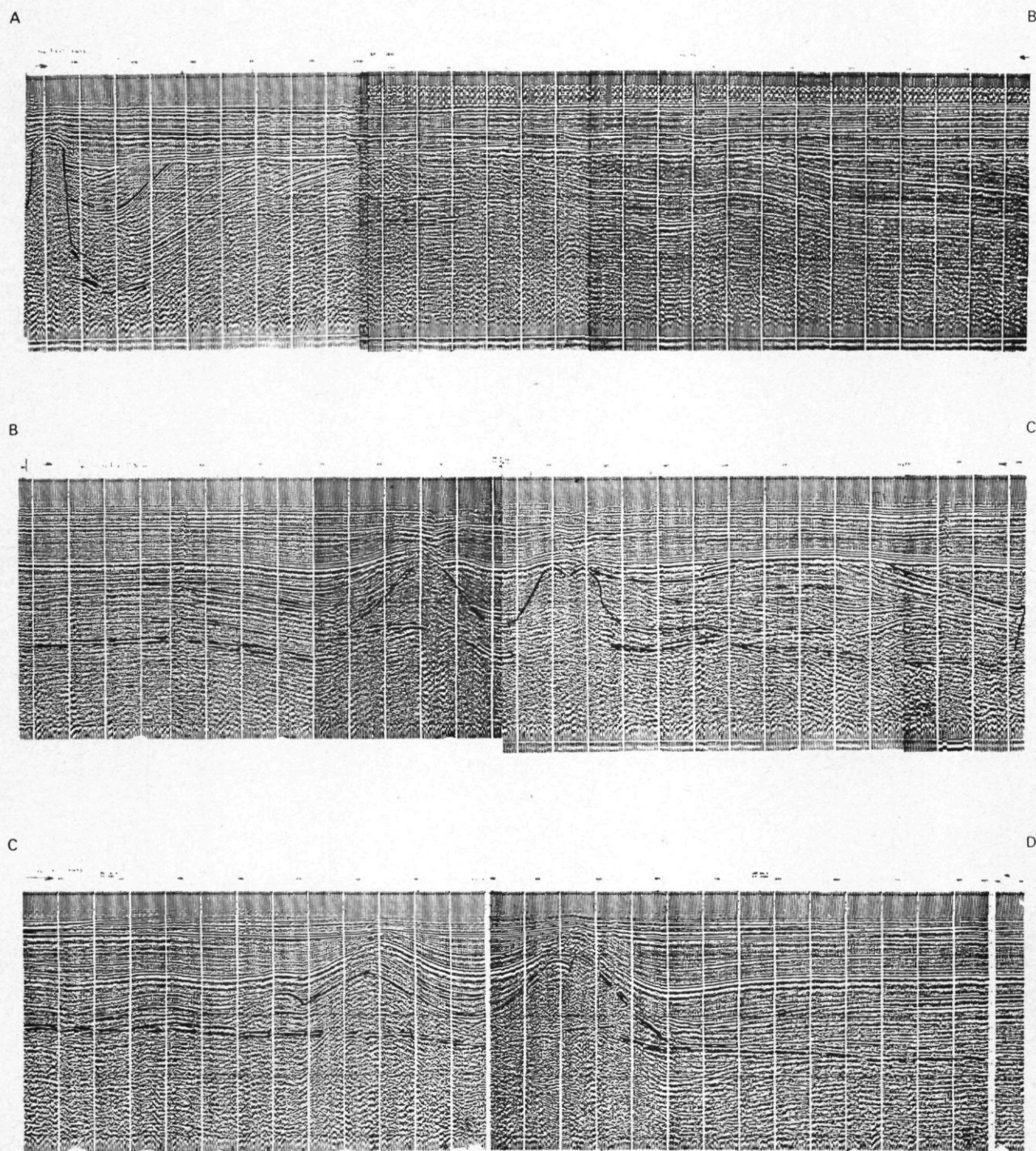


Fig. 18. — Coupe sismique dans un Bassin intracratonique (Mer du Nord).

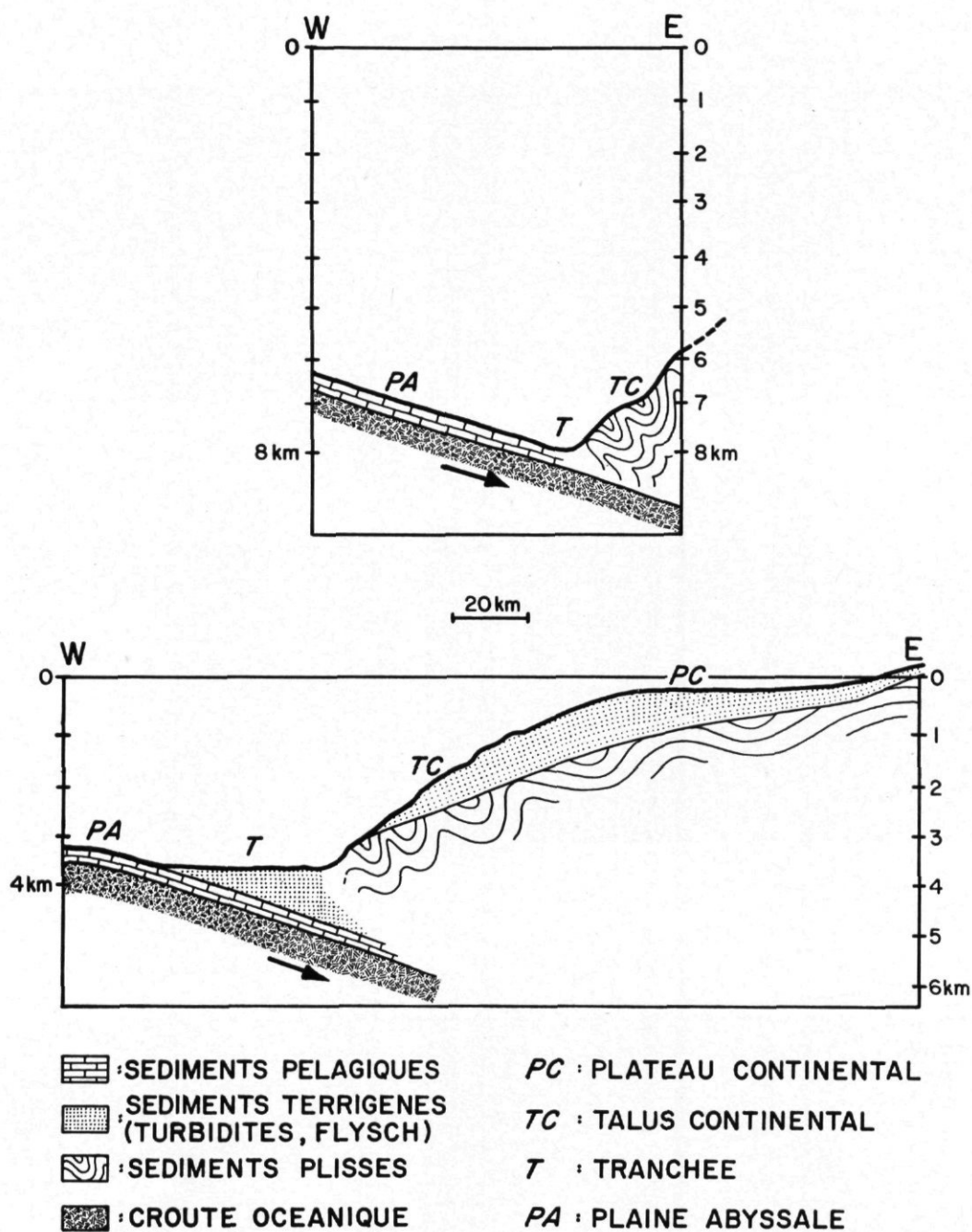


Fig. 19. — Marges continentales de type « Pacifique ».
Ex. : Pacifique Nord.

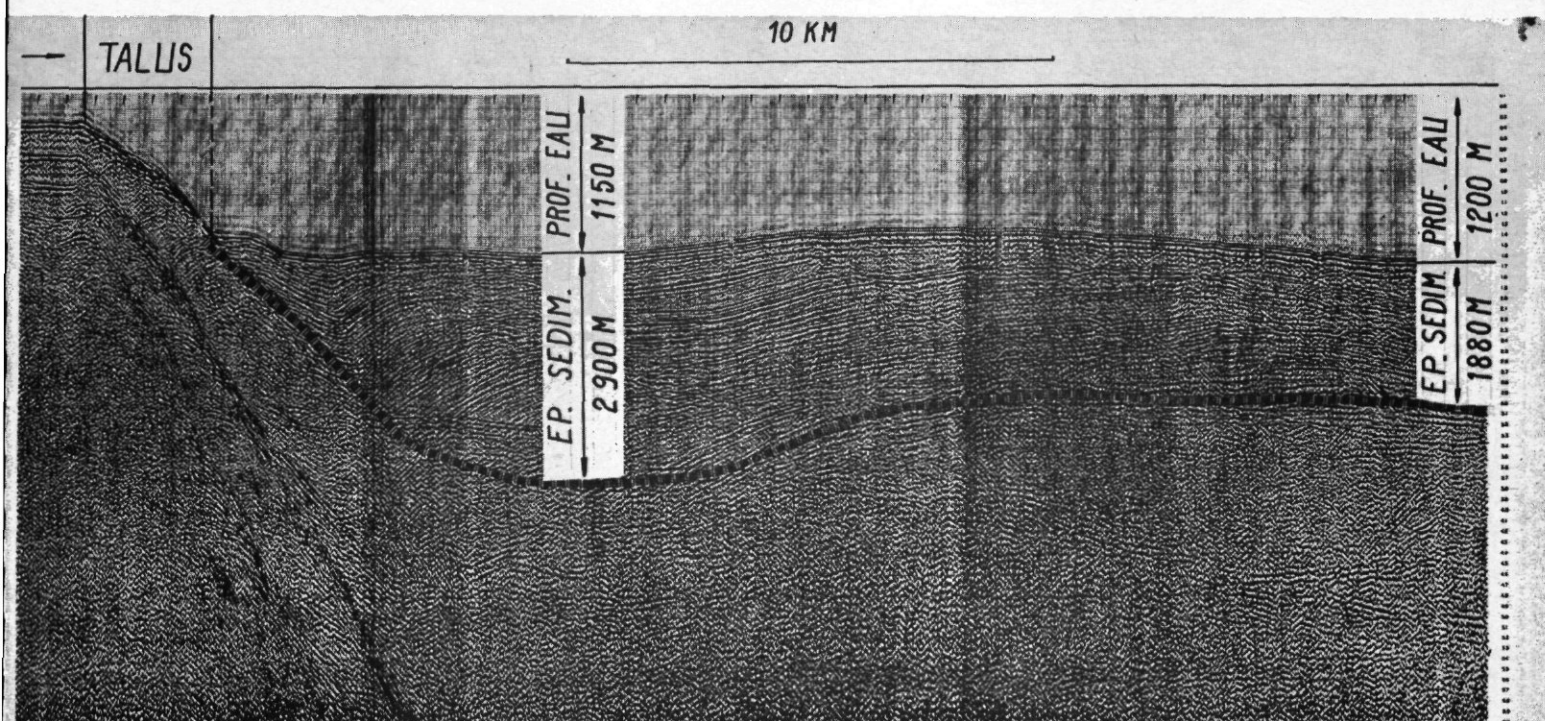
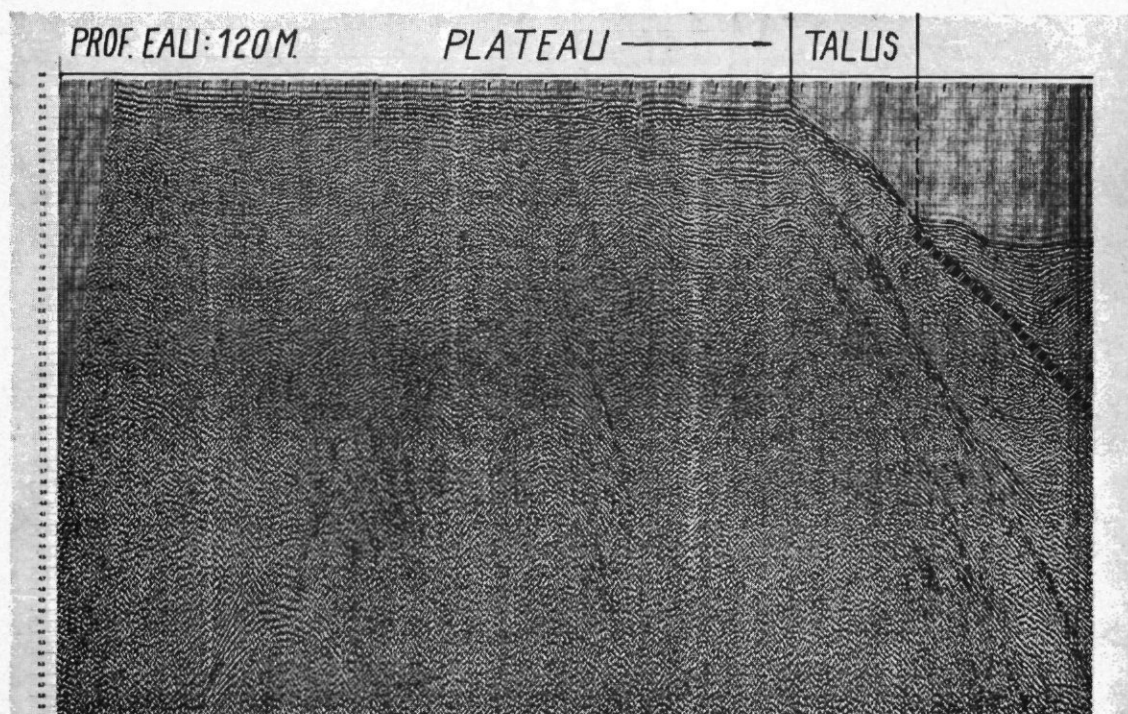


Fig. 20. - Méditerranée Orientale
Coupe sismique illustrative.

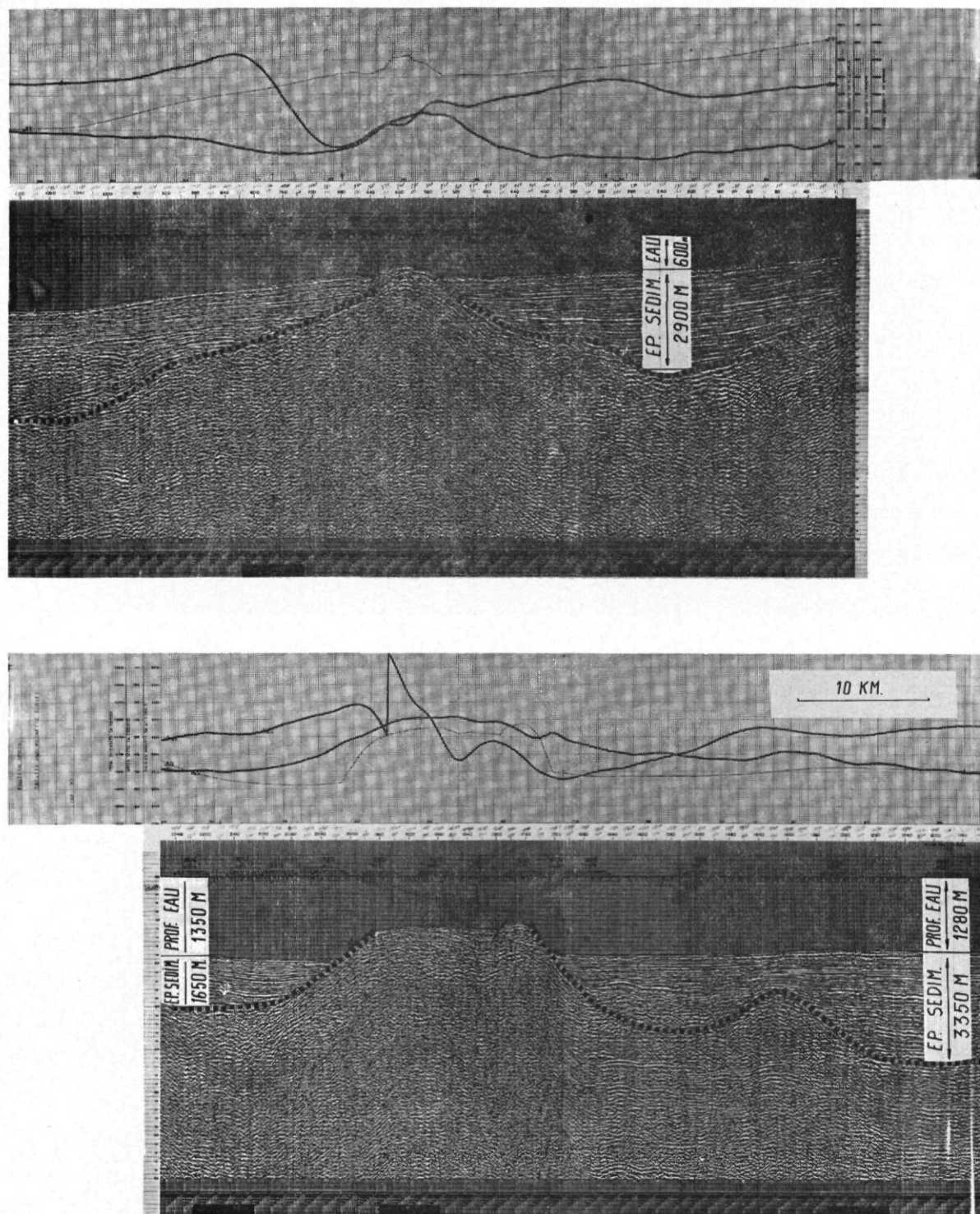


Fig. 21. — Méditerranée occidentale.
Coupe sismique illustrative.

qu'il faut un minimum de 1.500 m d'enfouissement pour que du pétrole commence à se former dans les zones à gradient de température normal (fig. 22).

Ces considérations amènent à déprécier les régions du plateau et du glacis et certains bassins où l'épaisseur des sédiments n'a jamais atteint le seuil thermique nécessaire.

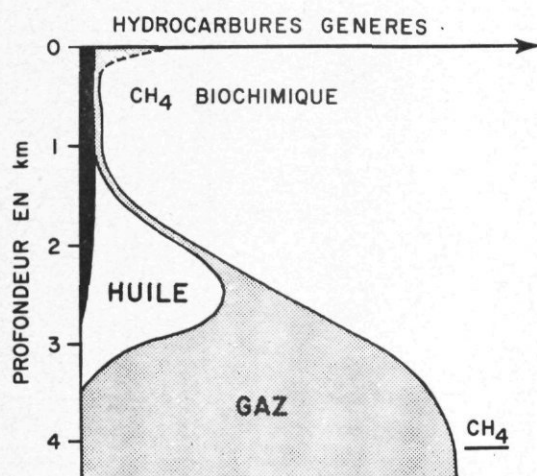


Fig. 22. — Schéma général de genèse des hydrocarbures. D'après Tissot 1974.

3.3.1.2. La lithologie du sédiment

Un deuxième élément est la présence ou non de roches réservoirs.

Les probabilités de trouver des réservoirs détritiques ou carbonatés de bonne qualité sont plus grandes dans les dépôts de plateau.

Dans les zones de dépôt de plus grande profondeur d'eau qui ont souvent été le siège de dépôts de glissement (turbidites), sédiments détritiques hétérogènes mal classés, lesquelles ne sont susceptibles de contenir des réservoirs que si une redistribution des éléments les plus grossiers a pu se produire sous l'action de courant profonds, ce qui limite les possibilités des talus et glacis.

— L'éloignement des marges continentales peut être aussi un élément négatif si les apports détritiques restent trop fins pour constituer des réservoirs.

— Par contre, on connaît d'énormes cônes deltaïques à forte pente à l'embouchure de certains grands fleuves (Indus, Gange), qui expliquent la présence très loin, à grande profondeur, de sédiments grossiers susceptibles également de former des réservoirs.

3.3.1.3. L'empîègement structural (fig. 23).

Un troisième élément est l'aspect structural des sédiments.

En général, le glissement vers le large des sédiments, favorisé par la présence de sel sur les marges passives, a permis leur structuration principalement sur le plateau et le talus :

— Structures halokinétiques, failles de croissance associées à des intumescences argileuses, structures de socle contemporaines de la formation du rift et recouvertes par des séries évaporitiques ou argileuses.

— Plissements tangentiels avec déversement vers les tranchées des marges actives.

A cela, il faut ajouter tout le cortège d'empîègements sédimentaires : biseaux, lentilles, récifs éventuellement, associés à ces déformations structurales.

L'analyse de ces déformations est devenue possible grâce aux perfectionnements de la sismique réflexion et permet de repérer les zones particulièrement favorables ou défavorables.

Par exemple, le glacis continental reste souvent peu structuré, ce qui lui retire une partie de son potentiel.

3.3.2. Aspect économique - Rapport coût-profit

Le dernier élément d'appréciation est le coût de la recherche et de l'exploitation, coût qui ne fait que grandir puisque les moyens à mettre en œuvre deviennent de plus en plus gigantesques par suite des distances à la côte et des profondeurs d'eau toujours plus grandes.

Aujourd'hui, on commence à explorer les bords du talus en Gulf Coast et en Mer du Nord, par exemple, et au large du delta du Mississippi la construction d'une plate-forme est prévue par 300 m d'eau. On exploite déjà par 150 m de fond à Forties en Mer du Nord.

En Mer du Nord, les gisements d'Ekofisk sont en exploitation et la production est écoulee par pipe-line vers la côte distante de 350 km.

Aussi le coût technique ne cesse de monter, inflation mise à part. Un paramètre intéressant est le *dollar investi pour produire un baril par jour* en moyenne sur une durée de 12 à 15 ans.

Si en valeur d'aujourd'hui, le coût de l'investissement atteint seulement 500 \$ le baril/jour en Arabie Séoudite, il est en moyenne de 1.000 \$ au Moyen-Orient, mais il dépasse déjà 10.000 \$ dans certains champs de la Mer du Nord.

Une récente analyse donne les moyennes suivantes par contrée :

— U.S.A.	5.200 \$
— Canada	5.100 \$
— Vénézuéla	1.265 \$
— Mer du Nord	7.200 \$

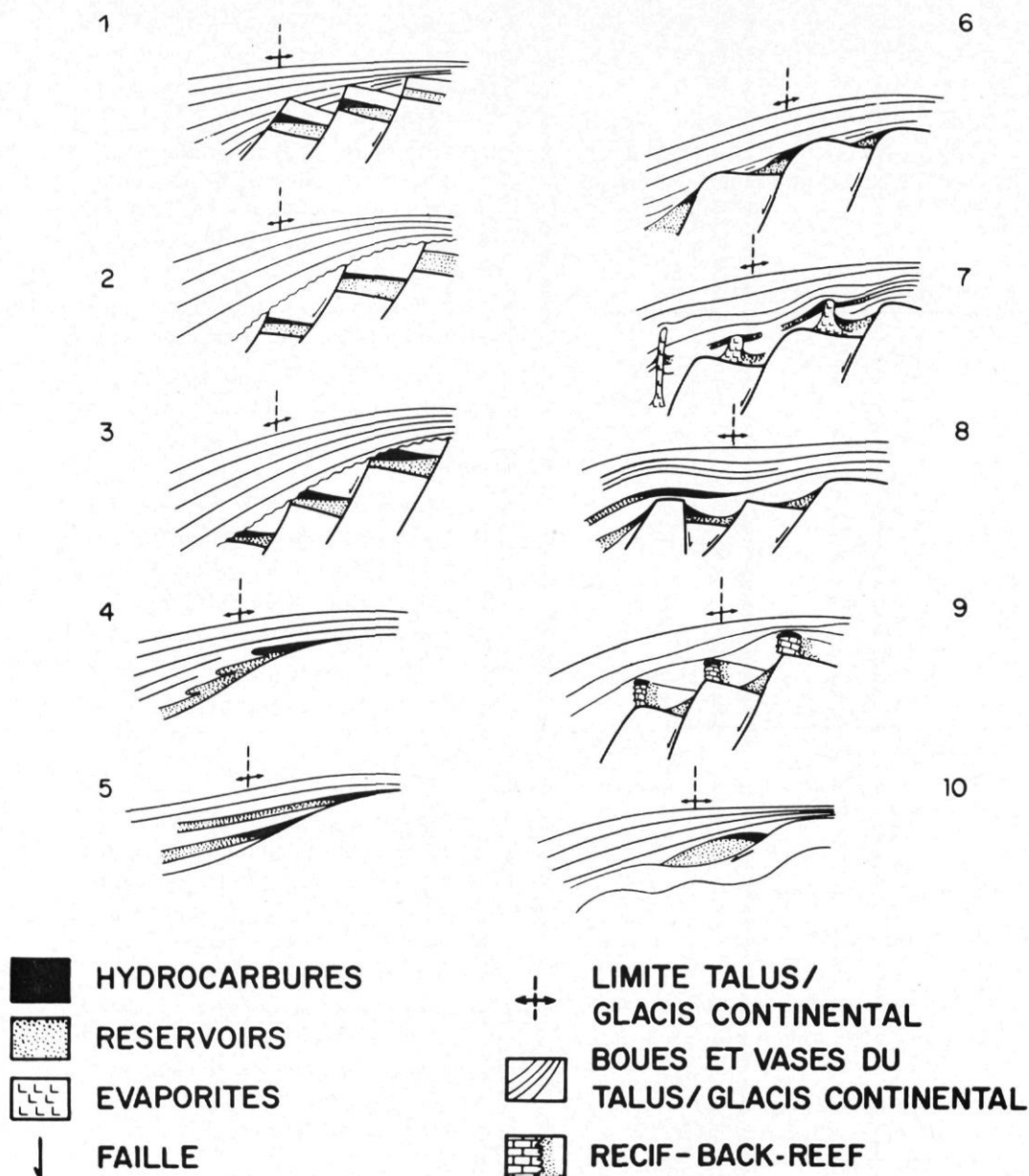


Fig. 23 — Schéma des divers pièges d'hydrocarbures possibles dans le talus et le glaciaire continental.
 D'après Caston - 1975.

— Nigéria	1.250 \$
— Libye	500 \$
— Arabie Séoudite	500 \$
— Indonésie	2.000 \$

Pour certains champs développés ou en cours de développement en Mer du Nord, on cite les chiffres suivants :

— Ekofisk	5.000 \$	180 m d'eau
— Brent	7.800 \$	150 m d'eau
— Ninian	8.500 \$	150 m d'eau
— Frigg	9.000 \$	100 m d'eau

Les investissements totaux atteignent déjà des sommes inquiétantes, plus de 5 milliards de dollars pour le complexe d'Ekofisk, probablement près du double pour le champ de Statfjord.

Dans ces conditions, on peut considérer que, si les progrès de la technique permettront de descendre peu à peu le long du talus, les coûts techniques pourraient devenir prohibitifs.

Il se dressera donc une barrière économique qui dépendra du prix que l'on voudra bien payer pour satisfaire nos besoins énergétiques croissants.

Les investissements nécessaires pour les sources d'énergie concurrentielles sont aujourd'hui, en effet, les suivants :

- pétrole synthétique à partir de sables asphaltiques
16.000 \$ baril/jour
- gaz synthétique à partir du charbon
21.000 \$ baril/jour équivalent
- électricité nucléaire (chaleur produite non considérée)
32.000 \$ baril/jour équivalent.

De plus, pour le pétrole s'ajoute l'élément risque, un forage à 18.000 pieds par 300 m d'eau peut aujourd'hui coûter 15 millions de dollars.

Récemment, le forage sec de la Mer d'Iroise, qui a rencontré des difficultés technologiques, a coûté 19 millions de dollars.

4. ESTIMATION DES SURFACES PROSPECTIVES ET DES RESERVES EN MER

Il ressort donc qu'une bonne partie du domaine potentiel marin ne sera sans doute jamais exploitée et que les chiffres de ressources globales théoriques correspondant à ce domaine sont à manier avec précaution, dans un sens plutôt conservateur.

On est ainsi amené à estimer les zones réellement intéressantes à une fraction des surfaces connues. D'après Weeks, elles seraient les suivantes (fig. 14) :

- plateau continental 5,4.10⁶ km² ou 25 %
- talus 4,6.10⁶ km² ou 15 %
- glaciés 1,7.10⁶ km² ou 10 %
- bassins océaniques isolés 2,8.10⁶ km² ou 15 %
- tranchées 0,6.10⁶ km² ou 10 %

soit seulement 4 % de la surface totale des mers et océans, et la répartition des ressources disponibles en huile en mer s'établirait comme suit (fig. 24) :

- plateau continental 60 % (dont 7 % déjà produits)
- talus 20 %
- bassins isolés 15 %
- glaciés 4 %
- tranchées 1 %

Finalement, les ressources globales du monde, estimées exploitables, seraient les suivantes (fig. 25) :

417 . 10⁹ TEP

- soit 73 % sur terre (dont 16,5 % déjà produits)
- 27 % en mer (dont 6,2 % déjà produits)

soit pour l'huile : 276.10⁹ tonnes dont 43.10⁹ tonnes produites (fig. 26).

— terre	72 %	déjà produits	14 %
		réserves prouvées à ce jour	29 %
		réserves à découvrir	29 %
— mer	28 %	déjà produits	2 %
		réserves prouvées à ce jour	8 %
		réserves à découvrir	18 %

et pour le gaz ; 170.10¹² m³ dont 17.10¹² m³ produits (fig. 27)

— terre	77 %	déjà produits	9 %
		réserves prouvées à ce jour	30 %
		réserves à découvrir	38 %
— mer	23 %	déjà produits	1 %
		réserves prouvées à ce jour	8 %
		réserves à découvrir	14 %

Ces quelques chiffres sont évocateurs. Pour l'huile, on voit que, dans les réserves à découvrir, 1/3 doit provenir de la mer et pour le gaz 1/4. Ce qui donne l'importance qui s'attache à la prospection en mer, malgré les difficultés techniques, malgré les coûts.

Mais on constate aussi que le domaine marin, malgré les surfaces énormes qu'il couvre, malgré sa meilleure distribution géographique, ne résout pas le problème. Son exploitation vient à son heure pour pallier au déclin des réserves des bassins terrestres, mais dans une proportion moindre qu'on aurait pu l'espérer. Il faut donc l'entreprendre de manière lucide en connaissant d'avance les limites et les rendements possibles.

...

Je remercie Monsieur Nicolas Golenko pour l'aide qu'il m'a apportée en préparant les statistiques reprises dans cet exposé.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE RECENTE

- Revue « Oil & Gas Journal » :
- May 5, 1975 « Statistics ».
- Dec. 15, 1975 « End seen for slump in global oil output » (d'après Exxon).
- Dec. 29, 1975 « Statistics ».

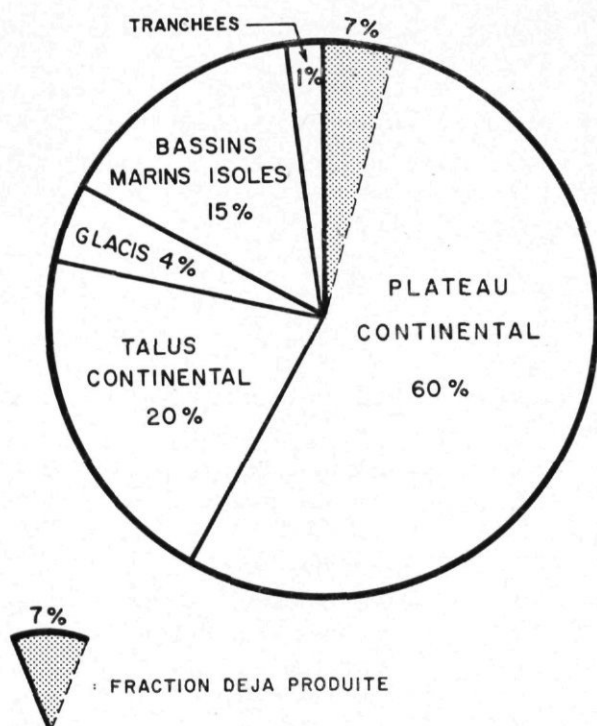


Fig. 24. — Répartition des ressources en huile dans les différentes zones des marges continentales.
D'après Weeks - 1974.

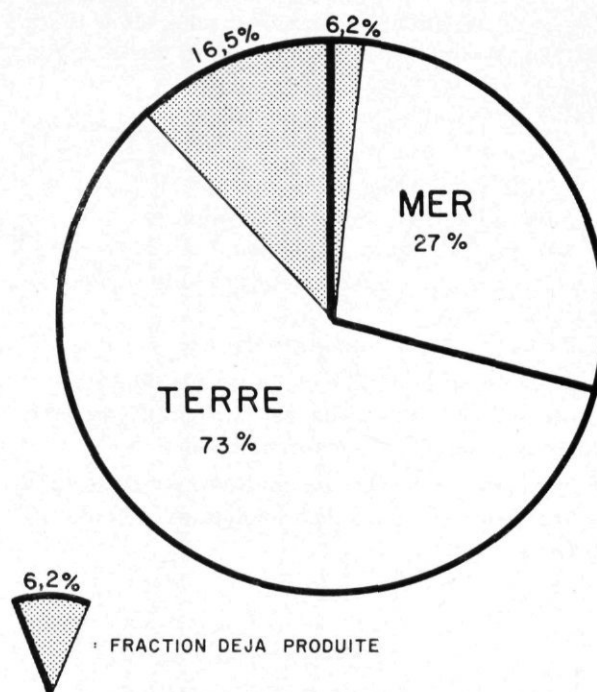


Fig. 25. — Ressources globales du monde en huile + gaz.
Production cumulée + réserves totales : 417×10^9 TEP ($1000 \text{ m}^3 = 0,83 \text{ TEP}$).
D'après Moody, Adams et al. - 1974 / 75.

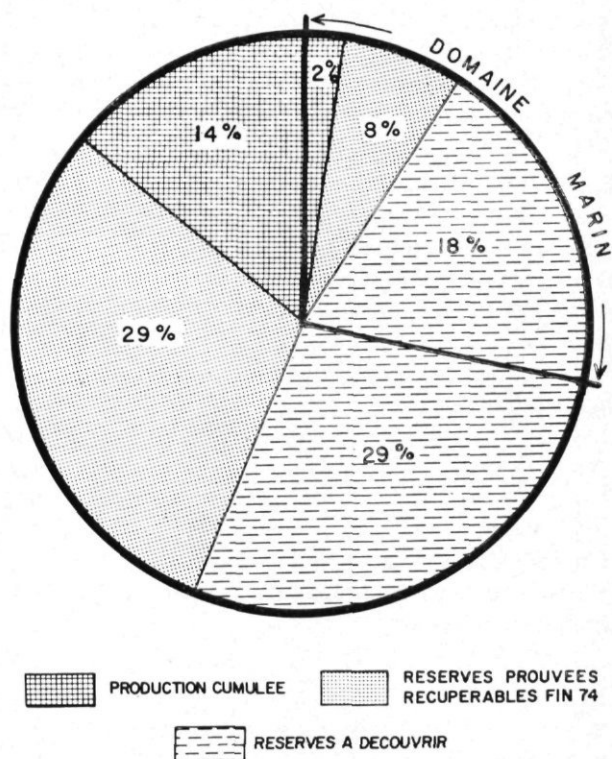


Fig. 26. — Ressources totales du monde en huile
Total : 276×10^9 tm.
D'après Moody et al. - 1974 / 75.

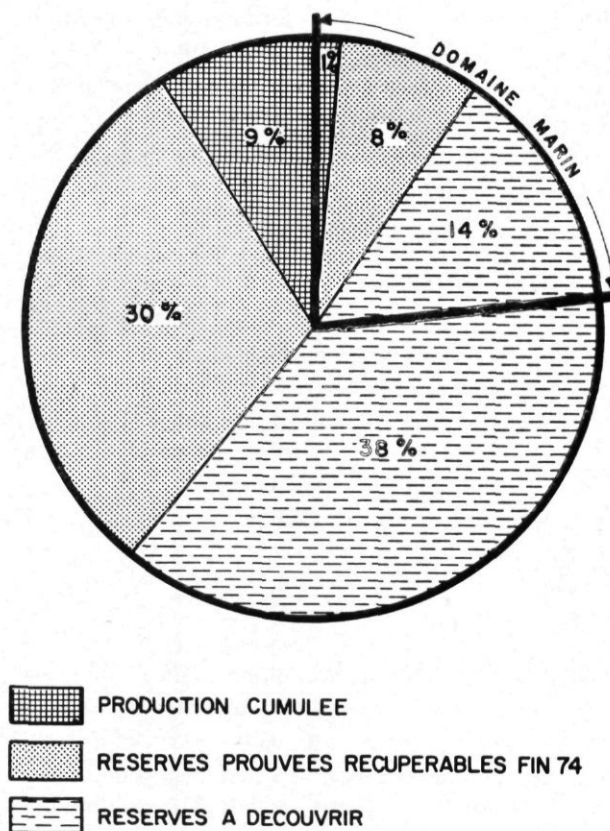


Fig. 27. — Ressources totales du monde en gaz.
Total : $170.000 \times 10^9 \text{ m}^3$.
D'après Adams et al. - 1974 / 75.

Revue « Offshore » :

- June 20, 1975 « Statistics ».

US Geological Survey :

- « Summary petroleum and selected mineral statistics for 120 countries, including offshore areas » (professional paper 817, 1973).
- « The worldwide search for petroleum offshore — A status report for the quarter century 1947-1972 » (circular 694).

Proceedings of the 8th World Petroleum Congress (Moscou 1971) :

- Weeks L.G. : « Geological and technical aspects specific to exploration for oil and gas on continental shelves ».

Proceedings of the 9th World Petroleum Congress (Tokyo 1975) :

- Adams, Kirby : « Estimate of world gas reserves ».
- Moody : « An estimate of the world's recoverable crude oil resources ».
- Poulet M., Montadert L., Sallé Cl., Grau G. : « Tectonique globale et évolution structurale des bassins sédimentaires ».
- Bally A.W. : « A geodynamic scenario for hydrocarbon occurrences ».

- Roberts D.G. : « Petroleum potential of the deep Atlantic Ocean ».

The Geology of Continental Margins : Burk C.A. & Drake C.L. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1974) :

- Burk C.A., Drake C.L. : « Continental margins in perspective ».
- Drake C.L., Burk C.A. : « Geological significance of continental margins ».
- Heezen B.C. : « Atlantic type of continental margins ».
- Fisher R.L. : « Pacific type of continental margins ».
- Scholl D.A., Marlow M.S. : « Sedimentary sequence in North Pacific trenches ».
- Weeks L.G. : « Petroleum resources potential of continental margins ».

Annales des Mines de Belgique (9, 1972)

- Masson P. : « Le pétrole - Horizon 80 » (étude présentée aux Journées de l'Industrie Minérale à l'U.L.B., décembre 1971)

AAPG Bulletin V. 58 n° 3 (March 74), p. 499-506

- Tissot B., Durand B., Espitalié J., Combaz A. : « Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum ».